

Treball final de grau:

**Disseny d'un sistema de regulació per
aconseguir una distribució uniforme de
fitosanitaris aplicats amb una barra
polvoritzadora**



Grau en Enginyeria Mecànica



Autor: Adrià Purroy López

Director del treball: Josep Illa Alibés

Lleida, Setembre 2017

Índex

1.	Introducció	4
1.1.	Objectius	4
2.	Antecedents	5
2.1.	Productes fitosanitaris	5
2.2.	Mètodes d'aplicació de productes fitosanitaris	5
2.3	Components d'un polvoritzador de barra.....	12
2.3.1	El dipòsit	12
2.3.2	La bomba	13
2.3.3	Els filtres	15
2.3.4	El sensor de pressió.....	15
2.3.5	El sistema de distribució.....	16
2.3.6	El sistema de regulació.....	16
2.3.7	La barra de polvorització	19
2.3.8	Els broquets.....	19
2.4	Funcionament d'un polvoritzador de barra	23
2.4.1	Funcionament general del sistema CPA.....	23
2.4.2	Funcionament general del sistema PWM	26
2.4.3	Sistema GPS.....	28
3.	Memòria.....	31
3.1.	En què consisteix la regulació que es vol realitzar?	31
3.2.	Efecte del seccionament de la barra	35
3.3.	Elecció del sistema adequat per dur a terme la regulació	38
3.4.	Modelització del sistema de regulació <i>PWM</i>	41
3.4.1.	Càlcul del cabal de cada broquet	41
3.4.2.	Càlcul del cicle de treball de cada solenoide.....	58
3.4.3.	Regulació de la pressió general del sistema.....	63
3.4.4.	Pèrdues de pressió en el sistema	65
3.4.5.	Esquema general del software de regulació	68
3.4.6.	Simulacions del funcionament del sistema	71
3.4.7.	Limitacions del sistema de regulació.....	78
3.4.8.	Estructura del sistema de regulació	79
3.4.9.	Selecció dels elements que formen el sistema	81

4.	Pressupost	110
4.1.	Estat d'amidaments	110
4.2.	Pressupost del sistema de regulació	112
5.	Conclusions	114
6.	Referències bibliogràfiques	115
7.	Annexes	118
7.1.	Codi MATLAB	118
7.1.1.	Data	118
7.1.2.	Script general (Simulacions 1 i 2)	118
7.1.3.	Regressió lineal (RL)	120
7.1.4.	Correcció de les dades d'entrada en la regressió lineal (corrRL)	120
7.1.5.	Estudi de l'ajust del mètode de RL	121
7.1.6.	Cabal del broquet (QfBroq)	122
7.1.7.	Velocitat d'avançament adequada (VelA)	123
7.1.8.	Càlcul pèrdues de càrrega en la barra (CalculPDC)	123
7.1.9.	Script figura 53, Gràfic Simulació 3	124
7.1.10.	Estudi de l'ajust del mètode de l'ajust circular 'circlefit'	125
7.2.	Catàlegs (A partir de la pàgina 128)	127

1. Introducció

L'aplicació de productes fitosanitaris en cultius extensius és un tema sensible amb el medi ambient, ja que una dosi excessiva genera problemes ecològics, mentre que una dosi massa baixa suposa problemes per l'agricultor. La maquinària agrícola actual de polvorització de fitosanitaris disposa de sistemes que permeten equilibrar força aquesta problemàtica esmentada. No obstant, l'augment de la intensitat de cultiu deguda, per una part, a la millora tecnològica de les eines de treball, però també, a la necessitat d'augmentar la producció per part del pagès amb l'objectiu de compensar una devaluació del preu del producte cada vegada més insostenible, fa que aquests sistemes no siguin suficients per frenar l'impacte ecològic d'aquesta activitat.

1.1. Objectius

En aquest projecte es marca com a objectiu dur a terme un primer disseny d'un sistema de regulació de la quantitat de producte fitosanitari que subministra una barra polvoritzadora per tal d'adaptar-se al moviment que aquesta realitza. Així doncs, caldrà determinar quin és el mètode més adequat per dur a terme aquest tipus de regulació.

També es pretén determinar un model matemàtic per calcular amb la màxima precisió possible la trajectòria traçada per la màquina, a partir de certes dades obtingudes via GPS.

El funcionament del sistema es mostrarà a través d'una simulació amb el software MATLAB de diverses situacions de treball que permetran veure com el sistema es comporta en cada una.

També es considera important que aquest projecte serveixi per conscienciar a la gent sobre la importància de realitzar una correcta aplicació de la dosi de fitosanitaris i mostrar els beneficis que això suposa per totes les parts, promovent així el mercat de la maquinària agrícola de precisió.

Pel que fa a l'abast del projecte, en aquest no es pretén dissenyar un sistema definitiu per posar al mercat. Es tracta d'un prototip per realitzar una primera aproximació al sistema definitiu, proporcionant una base consistent per un futur desenvolupament.

2. Antecedents

2.1. Productes fitosanitaris

El terme producte fitosanitari engloba un concepte molt ampli, fa referència a totes les substàncies destinades a la protecció dels cultius i que, segons la finalitat que persegueixen, poden ser: insecticides, acaricides, herbicides, fungicides, bactericides, nematocides, rodenticides i mol·lusquicides.

Des de el punt de vista del pagès, les característiques més importants dels productes fitosanitaris són: l'eficàcia, la tenacitat, la toxicitat, la fitotoxicitat i la seva compatibilitat amb altres productes.

Caldrà diferenciar correctament els termes: toxicitat i fitotoxicitat. Entenent el primer com la capacitat d'una substància química de produir efectes perjudicials sobre un ésser viu animal en entrar en contacte amb ell, mentre que el segon fa referència als efectes perjudicials sobre altres plantes.

2.2. Mètodes d'aplicació de productes fitosanitaris

S'entén per aplicació de productes fitosanitaris l'acció de posar en contacte aquest producte amb la plaga, malaltia o mala herba que s'ha de controlar. Aquesta acció pot realitzar-se per diferents mètodes, els quals poden classificar-se en dos grans grups: dispersió aèria i dispersió directa.

En aquest treball es centrarà l'atenció en els **polvoritzadors**, és a dir, en els equips per tractar amb productes en estat líquid per mitjà de la dispersió aèria. Dins la categoria de polvoritzadors, aquests es poden categoritzar segons el sistema que utilitzen per generar les gotes:

- **Sistema de polvorització hidràulica i hidropneumàtica.**

La polvorització hidràulica és el tipus de polvorització més utilitzada. S'utilitza en tot tipus de cultius, espais verds, jardins i masses forestals.

Per a la formació de les gotes per aquest sistema es necessita un circuit hidràulic que reuneixi els dos elements següents:

- Una **bomba** encarregada de subministrar la pressió al preparat fitosanitari.
- Un orifici de sortida, de petit calibre, anomenat **broquet**.



Figura 1. Diferents models i calibres de broquets. Al passar el líquid a pressió pels broquets, aquest es transforma en gotes.

Destaquen en aquesta categoria els **polvoritzadors de barres**, que són el tipus de polvoritzador sobre el qual s'aplica el sistema de regulació que es pretén dissenyar en aquest treball.



Figura 2. Polvoritzador hidràulic de barra suspès Hardi MASTER GEO de 18m.

- **Sistema de polvorització pneumàtica.**

És menys habitual que l'anterior, però s'utilitza de forma rellevant en algun cultiu com la vinya. Es caracteritza per produir gotes fines o molt fines a partir de posar en contacte el líquid amb **corrents d'aire** que el fraccionen i el transporten cap al cultiu, fins i tot a les seves capes més interiors.

- **Sistema de polvorització centrífuga.**

S'utilitza, sobretot, en alguns equips portàtils adreçats al tractament de jardins. El seu funcionament es basa en la força centrífuga causada per un **disc rotatori** que desplaça el líquid cap a les vores, provocant la seva fragmentació en petites gotes.

- **Sistema de polvorització tèrmica.**

També anomenat termonebulització, és un tractament propi dels cultius protegits i, en alguns aspectes, presenta similituds amb la polvorització pneumàtica. Amb aquest sistema, les gotes es produeixen al posar en contacte el preparat amb els gasos calents.

També cal dir que l'èxit o el fracàs aconseguit en un treball d'aplicació de producte fitosanitari no depèn únicament de l'eficàcia del producte, tot i que normalment és el que s'acostuma a culpar. Hi ha altres factors, tant o més importants que aquest, que determinen la sort del funcionament de l'aplicació, com per exemple: l'època en que es realitza l'aplicació, l'estat de desenvolupament del problema, la qualitat de l'execució de l'aplicació i l'oportunitat d'aquesta. Tots els factors mencionats, conjugats de manera correcta, són els que realment determinen l'eficàcia del treball.

És una pràctica habitual que, per definir la qualitat de l'execució de l'aplicació per polvorització, s'utilitzi com a paràmetre el número de gotes de líquid que arriben a cada centímetre quadrat de superfície vegetal. En la taula 1 s'ofereix un exemple:

Taula 1. Exigències dels diferents tipus de tractaments per a una correcta aplicació.

Tipus de tractament	Nº gotes/cm ²	Diàmetre de les gotes (micres)
Insecticida	20 – 30	200 – 350
Fungicida	50 – 70	150 – 250
Herbicida de contacte	30 – 40	200 – 400
Herbicida de preemergència	20 – 30	400 – 600
Adobs líquids	5 – 15	500 - 1000

Tot i que normalment s'utilitzen aquests criteris, és evident que l'aplicació perfecta seria aquella que formés una barrera química contínua sobre la superfície vegetal.

D'aquesta forma, el producte, apart d'impedir el desenvolupament sobre la planta d'enemics reals o potencials, penetra millor i més ràpidament.

Anteriorment, per aconseguir una cobertura total de la superfície de les plantes, s'aplicaven grans volums de producte fitosanitari per hectàrea, augmentant aquest en cas que les gotes produïdes fossin més grans i també si la capacitat de mullar del producte fos inferior. Actualment, es sap que la manera més eficient d'obtenir un major recobriment de la superfície foliar és a partir de generar gotes de mida petita i homogènies.

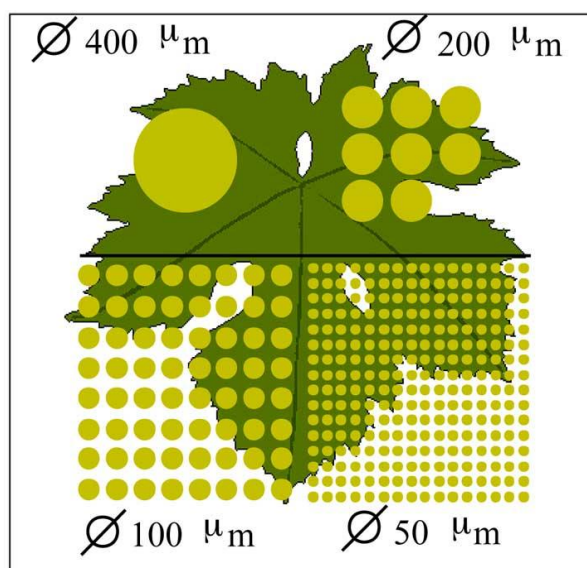


Figura 3. Influència de la mida de la gota en el recobriment foliar.

Com es pot observar en la Figura 3, com més petit és el diàmetre de la gota, major és la superfície coberta de la fulla per unitat de brou*. No existeixen acords establerts, però es consideren gotes petites les que tenen un diàmetre menor de 100 µm, mitjanes si tenen un diàmetre entre 200-300 µm i grans les de més de 400 µm.

Les gotes es produeixen en els broquets i la seva mesura ve determinada per la grandària de l'orifici de sortida i per la pressió de treball que s'aplica:

$$\varnothing = K \cdot \frac{S}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}} \quad (\text{Eq. 1})$$

On:

\emptyset : diàmetre mig de les gotes en micres (μm).

K : constant característica del broquet.

S : secció del orifici de sortida del líquid (μm^2).

g : gravetat $9,8 \text{ m/s}^2$.

h : pressió de treball en metres de columna d'aigua (mca).

***brou:** Barreja d'aigua amb producte fitosanitari.

Es interessant observar l'estudi realitzat en el document *Tecnología de la pulverización de productos fitosanitarios sobre las plantas cultivadas*, de Porras Piedra, A. i Porras Soriano, A. En ell es pot observar com augmenta el recobriment de la planta a mesura que es redueix el diàmetre de la gota expulsada pel broquet:

Taula 2. Variació amb la pressió de les característiques de la població de gotes. Font: Porras Piedra, A i Porras Soriano, A.

Pressió (kP/cm ²)	Diàmetre de les gotes (micres)	Nº de gotes/hectàrea	% de recobiment
1	424,25	$25,01 \cdot 10^8$	13,78
2	300	$70,73 \cdot 10^8$	19,49
3	244,94	$129,96 \cdot 10^8$	23,87
4	212,12	$200,10 \cdot 10^8$	27,57
5	189,73	$279,63 \cdot 10^8$	30,82
6	173,19	$367,65 \cdot 10^8$	33,77
7	160,35	$463,22 \cdot 10^8$	36,47
8	149,99	$565,99 \cdot 10^8$	38,99
9	141,41	$675,39 \cdot 10^8$	41,36
10	134,16	$790,91 \cdot 10^8$	43,59
15	109,54	$1.453,05 \cdot 10^8$	53,39
20	94,86	$2.237,44 \cdot 10^8$	61,65

Molt més representatiu és el gràfic que s'obté a partir de les dades de la Taula 2:

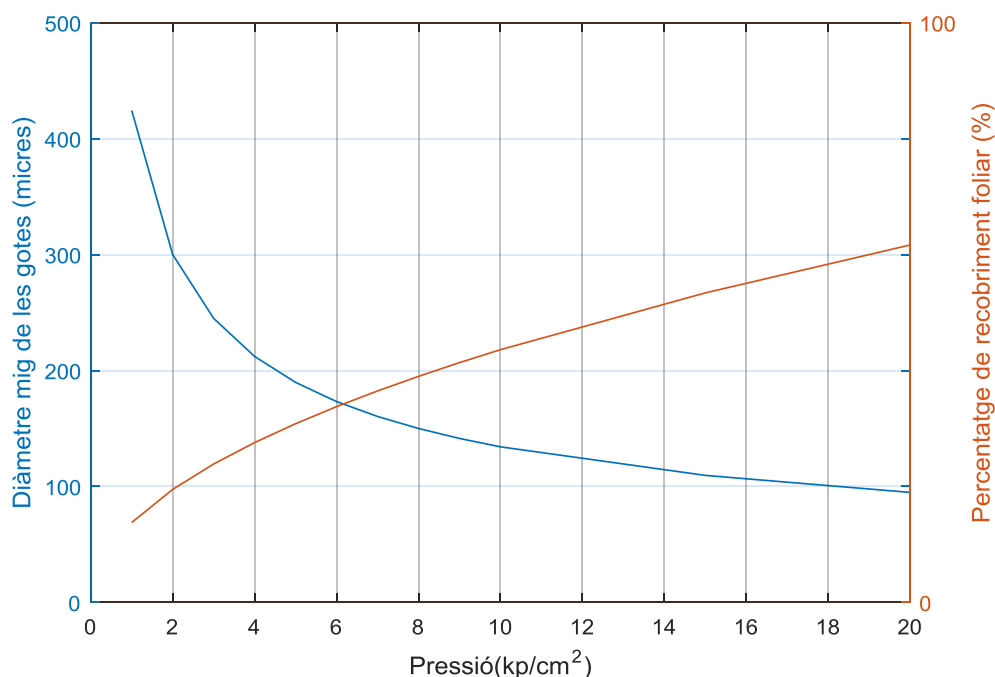


Figura 4. Variació del diàmetre mig de les gotes generades pels broquets i del percentatge de recobriment foliar en funció de la pressió de treball.

Cal destacar que la producció d'una gota massa petita generen un altre problema, que poden ser arrossegades pel vent amb més facilitat i, per tant, no arribar al objectiu previst. Aquest fenomen s'anomena **deriva**.

Per evitar que es produeixi aquest fenomen, el més important, lògicament, és produir unes gotes suficientment grans com perquè no puguin ser arrossegades pel vent amb tanta facilitat.

La *Llei d'Stokes* permet calcular, en teoria, la velocitat de caiguda de les gotes:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{\varnothing^2}{4} \cdot \frac{\delta_g - \delta_a}{\eta} \cdot g \quad (\text{Eq. 2})$$

On:

v : velocitat de caiguda (m/s).

\varnothing : diàmetre mig de les gotes (cm).

δ_g : densitat de la gota (g/cm³).

δ_a : densitat del aire (g/cm³).

η : viscositat dinàmica del aire (*Poises*).

g : gravetat 980 cm/s^2 .

A partir d'aquesta equació, Porras Piedra i Porras Soriano donen uns resultats teòrics suposant una altura de caiguda de 2 metres i unes corrents d'aire de 10 km/h.

Taula 3. Distància recorreguda a la deriva per les gotes. Font: Porras Piedra, A i Porras Soriano, A.

Diàmetre de les gotes (micres)	Distància de la deriva (m)
10	17.369
25	2.779
50	694
75	308
100	173
125	111
150	77
175	56
200	43
225	34
250	27
275	22
300	19
325	16
350	14
375	12
400	10
425	9
450	8
475	7
500	6

En la figura 5 s'observa la representació gràfica de les dades de la Taula 3, permet veure de manera molt més representativa la influència de la mida de la gota en el fenomen de deriva:

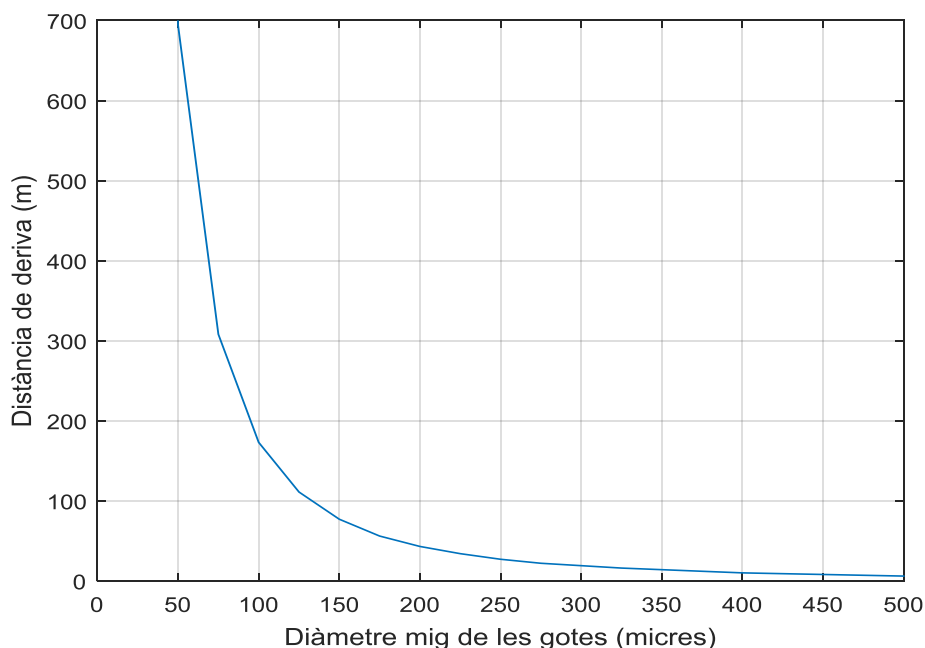


Figura 5. Distància de deriva recorreguda per les gotes en funció del seu diàmetre.

A partir de tota aquesta informació, cal deduir que es de gran importància que el diàmetre mig de les gotes produïdes sigui, per una banda, suficientment petit per realitzar un correcte recobriment de la superfície foliar i, a més a més, que sigui suficientment gran com per no patir problemes de deriva del producte.

2.3 Components d'un polvoritzador de barra

2.3.1 El dipòsit

És el recipient que conté el brou, és a dir, la barreja de producte fitosanitari amb aigua que s'ha de distribuir durant el tractament. Es fabrica amb materials plàstics, normalment **polietilè** i la rugositat de les seves parets no ha de sobrepassar els límits establerts per la normativa.

Un dels elements més importants del dipòsit és **el sistema d'agitació**, que pot ser mecànic o hidràulic i la seva funció és assegurar l'homogeneïtat de la preparació fitosanitària durant l'aplicació.

2.3.2 La bomba

Es tracta d'un dels elements més importants del polvoritzador, ja que impulsa el líquid a pressió a través de les conduccions, les vàlvules i els broquets.

Les bombes utilitzades normalment en els equips de polvorització són dels següents tipus:

- **Bombes de pistons:** Són les més utilitzades, juntament amb les de membrana. L'aspiració i compressió del líquid són provocades pel vaivé d'uns pistons a l'interior de la bomba. Poden treballar a **pressions altes** (< 60 bar) i resisteixen bastant bé l'abradió.

Les bombes de pistons presenten un avantatge molt important, i és que a un determinat règim de funcionament, el **cabal** produït és pràcticament **constant** i independent de la pressió de treball (Figura 6).



Figura 6. Bomba de pistons hidràulica.

La corba característica d'aquest tipus de bombes és de la següent forma:

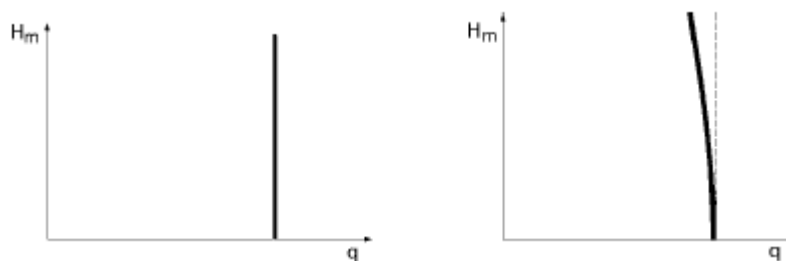


Figura 7. Corba característica teòrica (esquerra) i real (dreta). *Font: Bombas Volumètriques, de Pedro Fernández Díez.*

- **Bombes de membrana:** Realitzen l'aspiració i la impulsió del líquid per flexió d'una membrana sotmesa a un moviment alternatiu de petita amplitud. Permeten treballar a **pressions màximes de 20-30 bar**. El seu cabal tendeix disminuir quan la pressió augmenta.

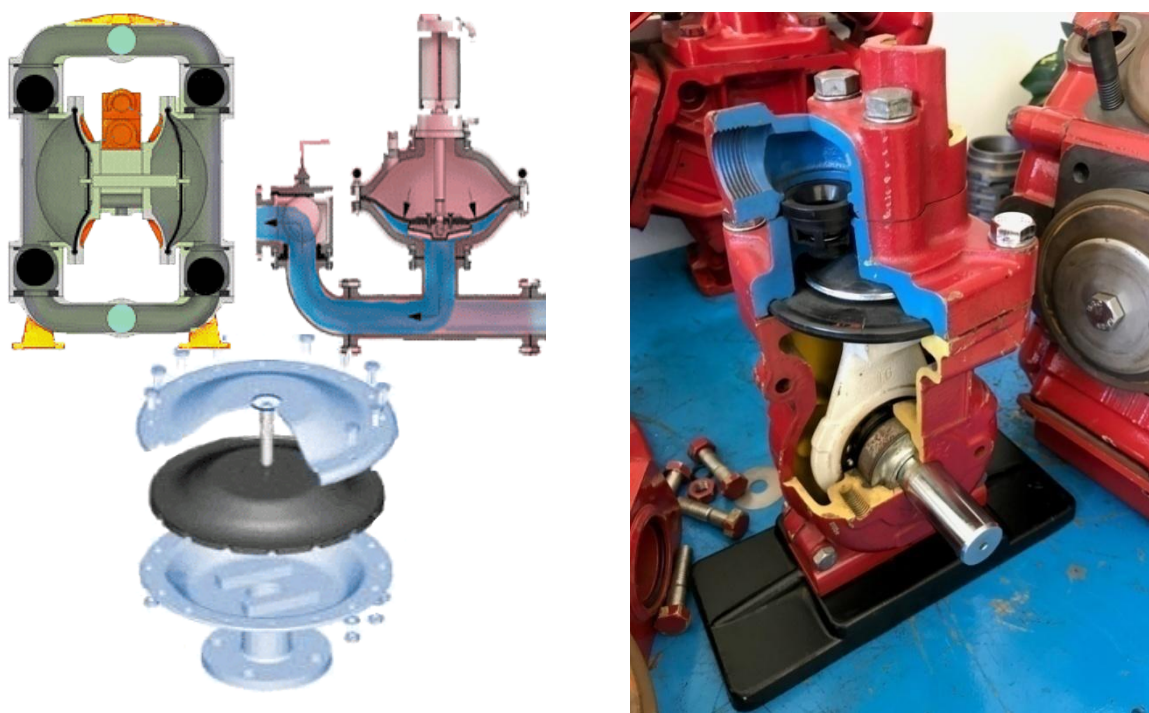


Figura 8. Funcionament d'una bomba de membrana (esquerra) i mostra d'una d'Ilemo-Hardi (dreta).

- **Bombes centrífugues:** Eleven la pressió del brou gràcies a un rotor que gira a un elevat règim. Són **hidrodinàmiques**, és a dir, que el cabal que produeixen va en funció de la pressió de treball, de manera que, a més pressió, menor és el seu cabal. Proporcionen cabals elevats a baixa pressió (2-4 bar) i es solen utilitzar com a bomba auxiliar per a l'agitació i, sobretot, per moure grans volums de líquid a baixa pressió.

2.3.3 Els filtres

Són els elements que retenen les partícules sòlides que poden ocasionar l'obstrucció dels broquets i el deteriorament de determinats elements del circuit hidràulic. Els filtres poden ser d'acer inoxidable o de poliamida.



Figura 9. Filtre ubicat a la zona d'impulsió de la bomba.

Dins d'un equip de tractament, els filtres s'ubiquen en diferents zones:

- **A l'orifici d'ompliment de l'equip de tractament.**
- **A la zona d'aspiració de la bomba.**
- **A la zona d'impulsió de la bomba.**
- **Als broquets.**

Aquests últims no són necessaris, sempre i quan la resta siguin eficients.

2.3.4 El sensor de pressió

És l'instrument que s'utilitza per **mesurar la pressió del líquid** a l'interior del circuit hidràulic de l'equip polvoritzador. És important que sigui precís, fiable i adaptat al interval de pressions de treball.

Poden ser analògics (manòmetres) o digitals, en aquest treball es centrarà l'atenció en els segons, ja que la pressió serà un valor que caldrà tractar digitalment pel software que ha de dur a terme la regulació.

2.3.5 El sistema de distribució

El sistema de distribució d'un equip de tractament està format pel conjunt de **conduccions i vàlvules** encarregades d'alimentar els broquets per dur a terme la polvorització o de retornar el líquid al dipòsit (retorns).

L'accionament de les vàlvules pot ser manual, mecànic o elèctric (electrovàlvules). Aquest últim és el més recomanable per la seva rapidesa d'actuació i seguretat. També és el necessari per dur a terme la regulació que es pretén realitzar en aquest treball, així doncs, es centrarà l'atenció en ell.



Figura 10. Sistema de distribució amb electrovàlvules. *Font: Catàleg ARAG.*

Les conduccions han d'estar fabricades amb materials resistents a la corrosió i a l'abració i han d'estar degudament marcades. Les que connecten el sistema de distribució amb la barra han de ser flexibles i solen ser de polipropilè. Pel contrari, les del tub portabroquets són rígides i fabricades de plàstic o d'acer.

2.3.6 El sistema de regulació

Permet **regular el cabal** de líquid que surt dels broquets i mantenir constant el volum desitjat per unitat de superfície. Sense un sistema de regulació eficient, un increment de velocitat de l'equip polvoritzador, pot ocasionar una disminució de la dosi aplicada, de manera que perjudicaria l'eficàcia del tractament. Per aquest motiu, els sistemes de regulació permeten la modificació del cabal, ajustant-lo a les variacions de velocitat de l'equip de tractament.

Els sistemes de regulació més efectius són:

- **Els sistemes que proporcionen un cabal proporcional al règim del motor (CPM):** També coneguts com regulació per retorn calibrat. Permeten compensar les variacions de pressió provocades per la modificació del règim del motor, ja sigui a causa dels pendents del terreny o pel tancament dels diferents sectors de la barra.
- **Els sistemes que proporcionen un cabal proporcional a l'avançament (CPA):** Permeten aplicar sempre la mateixa dosi, independentment de la velocitat de treball (dins d'un rang). Incorpora:
 - Un sistema electrònic equipat amb dispositius per mesurar la velocitat i el cabal aplicat.
 - Un sistema central de control amb un microprocessador.
 - Un sistema d'actuació amb electrovàlvules motoritzades, que permeten modificar la pressió de treball en els broquets.
- **Els sistemes de regulació per ample de polsos o 'Pulse Width Modulated' (PWM):** Són sistemes que no estan massa estandarditzats, la majoria de màquines que els incorporen es troben a Amèrica del Nord i Austràlia. El motiu d'aquesta falta de reconeixement és que suposa un cost afegit a la màquina que moltes vegades el pagès no està disposat a assumir. Permeten aplicar la mateixa dosi independentment de la velocitat de treball, però a més a més, permetent un **control individualitzat per cada broquet**. Funciona amb solenoides normalment tancats, muntats en cada broquet, que permeten regular proporcionalment el cabal. De la mateixa manera que els sistemes CPA, també incorporen:
 - Un sistema electrònic amb GPS i sensors de pressió i de cabal.
 - Un sistema central de control amb microprocessador.
 - Un sistema d'actuació amb una electrovàlvula motoritzada que regula la pressió i les vàlvules solenoides que regulen el cabal de sortida per cada broquet.

La regulació es basa en dos conceptes: **el cicle de treball o 'Duty Cycle (DC)'** i la freqüència. El 'Duty Cycle' representa el percentatge del temps d'un cicle en què la senyal es troba encesa ('ON'), com es pot veure en la següent figura:

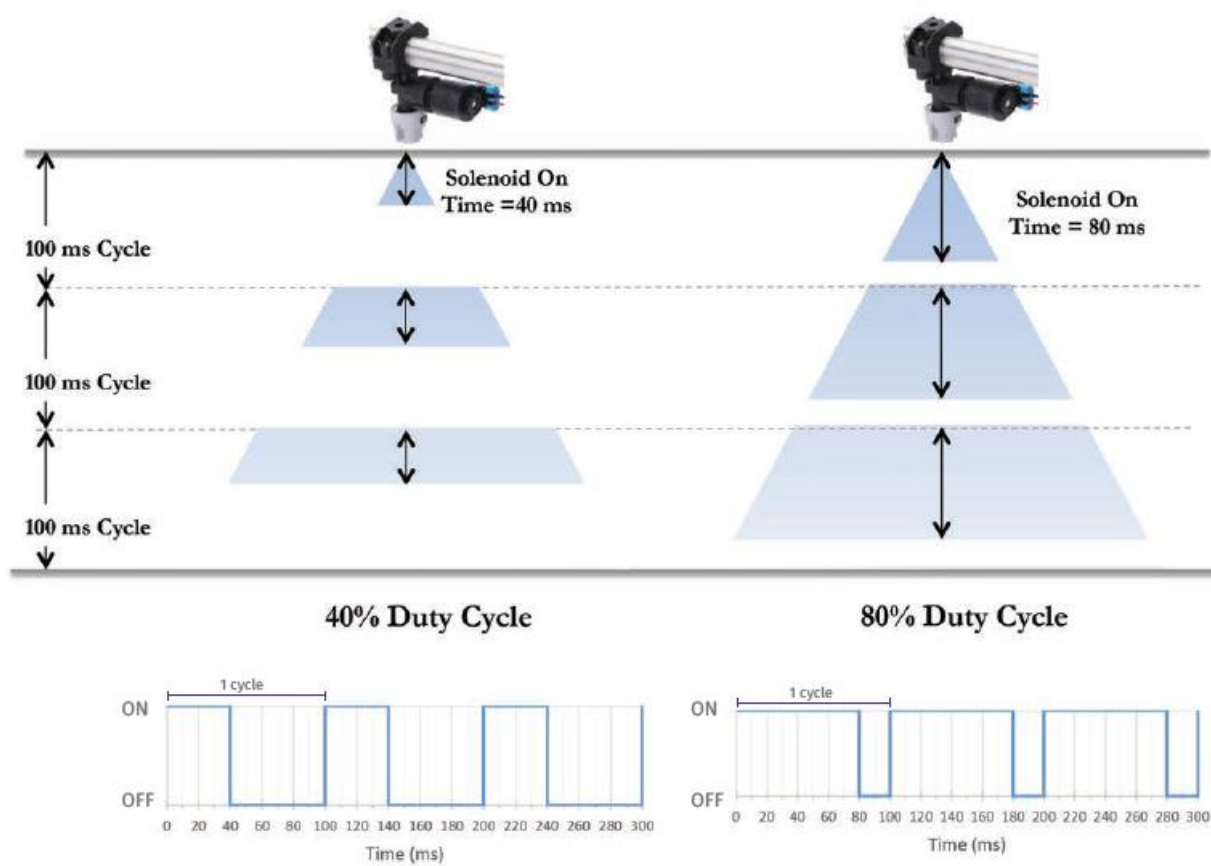


Figura 11. Diferència entre un 'Duty Cycle' del 40% (esquerra) i del 80% (dreta) en un sistema de regulació PWM de 10 Hz (cicle de 100ms) de freqüència. Font: *Pulse Width Modulated (PWM) Technology for Liquid Application*, de A. Sharda et al.(2016)

La majoria de sistemes de regulació PWM treballen a 10 Hz de freqüència, és a dir, 10 cicles per segon o cicles de 100ms.

La importància d'això es troba en què, quan el sistema treballa al 80% de 'Duty Cycle', proporciona el doble de producte durant aquells 100 ms que quan treballa al 40%. D'aquesta manera es pot **regular el cabal sense modificar la pressió de treball del broquet**.

Magnus et al. (2016) van demostrar que en aquests sistemes, la pressió a la barra es manté constant independentment del nombre de broquets que es trobin oberts o tancats durant els diferents cicles de treball, degut a que amb aquesta freqüència, el cabal de producte no té temps a augmentar la seva pressió durant el temps en què les vàlvules es troben tancades, d'aquesta manera es manté un solapament dels arcs d'aspersió uniforme i una mida de gota constant.

2.3.7 La barra de polvorització

És l'**estructura on van muntats els broquets** i que serveix de **suport per les conduccions**. La distància entre broquets al llarg de la barra ha de ser constant, generalment de 0,50 metres. És important que estiguin correctament orientats respecte a l'eix de la barra, sobretot en els broquets de ventall, per assegurar un bon solapament i evitar el xoc entre els raigs de polvorització.

En general, la longitud de les barres oscil·la entre els 8 i els 36 metres. D'altra banda, també hi ha barres de petites dimensions (2-4 m) per a tractaments específics i en petites superfícies.

El sistema de plegat i desplegat de la barra ha de ser segur i ha de constar d'un sistema de bloqueig per evitar que aquesta es desplegui durant el transport.



Figura 12. Barra polvoritzadora GEO de 21 metres de la marca HARDI. *Font: Ilemo-Hardi.*

2.3.8 Els broquets

La funció dels broquets és realitzar **fraccionament del líquid a pressió en gotes** petites i homogènies. Són els elements essencials en la polvorització i determinen la forma, la composició, la trajectòria i el impacte del flux del líquid de tractament.

Donada la seva importància, els broquets han de ser precisos i conservar les seves prestacions al llarg del temps. Els materials amb els que normalment es fabriquen són: el plàstic, l'acer inoxidable, el llautó i la ceràmica, essent aquest últim el que ofereix una millor resistència a l'acció dels productes.

Per a la polvorització fitosanitària s'utilitzen els següents tipus de broquets:

- **Broquets de ventall o raig pla:** Originen una polvorització de raig pla en travessar el líquid a pressió per un orifici de forma el·líptica o rectangular. El perfil de distribució del flux líquid és en forma de campana, per això és necessari que hi hagi solapament dels raigs per tal d'obtenir una distribució uniforme (Figura 13). Aquest tipus de broquets treballen a pressions entre 1,5 i 5 bar, i produeixen una polvorització de gotes mitjanes o grosses.

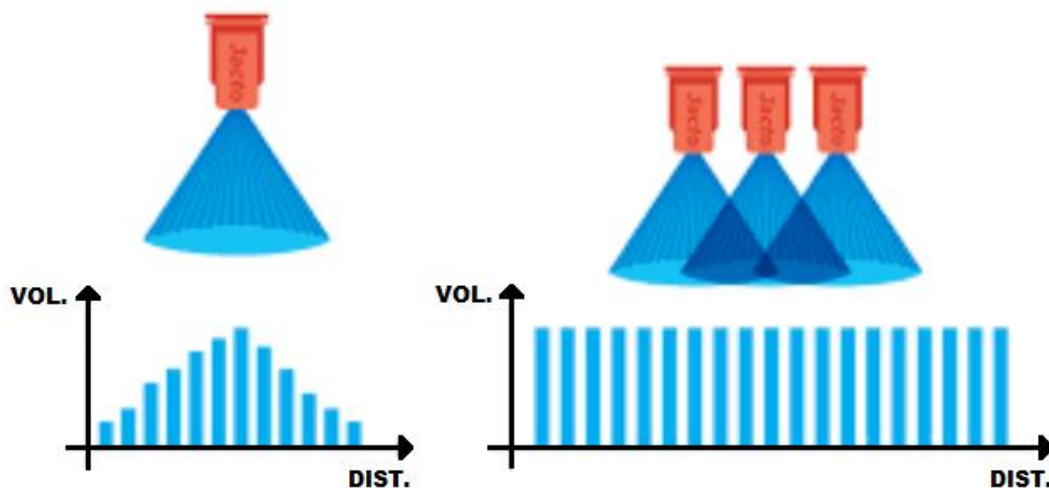


Figura 13. El solapament entre raigs individuals permet obtenir una distribució uniforme de l'aplicació.

- **Broquets cònics o de turbulència:** En aquests broquets, el líquid està sotmès a un moviment de rotació a l'interior de la cambra de turbulència i surt en forma de remolí per un orifici circular, produint un flux de líquid de tipus cònic.

L'interior d'aquest flux pot estar completament ple de gotes (con ple) o buit (con buit), en aquest últim cas, només es polvoritza una corona circular (Figura 14). Treballen a pressions entre 5 i 15 bar i generen unes gotes fines.

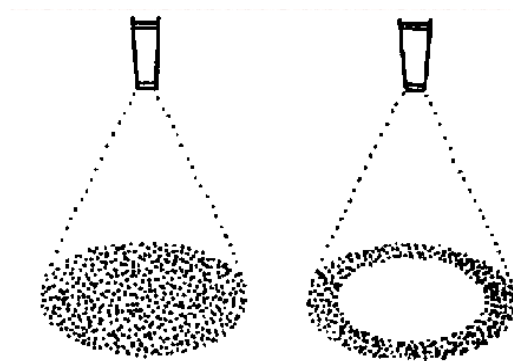


Figura 14. Diferència entre flux de con ple (esquerra) i flux de con buit (dreta). *Font: Cultivos Tradicionales, de David Leonard.*

- **Broquets deflectors o de mirall:** En aquest tipus de broquet, la polvorització es produeix al sortir el líquid a gran velocitat per un orifici i xocar contra una superfície plana que actua com a deflector. Treballen correctament a una pressió entre 0,5 i 2 bar i no necessiten solapar-se entre sí, ja que tenen un perfil de distribució prou uniforme.
- **Broquets de raigs múltiples:** Aquests tipus de broquets no formen realment una polvorització com a tal, sinó que es produeixen uns petits raigs molt prims de flux líquid amb l'objectiu d'aconseguir un repartiment més uniforme del producte que si s'apliqués amb un raig més gran.

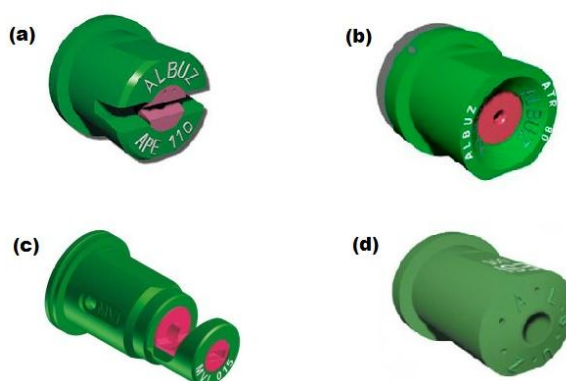


Figura 15. Tipus de broquets: (a) ventall, (b) cònic, (c) deflector, (d) raigs múltiples. *Font: Adaptació catàleg ALBUZ.*

- **Broquets amb preorifici:** Aquest tipus de broquets redueixen la pressió de treball de manera interna, produint gotes més grans que el broquets de raig pla convencionals. El preorifici restringeix la quantitat de líquid que entra en el broquet i crea una caiguda de pressió a través de la punta, de manera que es produeix una menor quantitat de gotes propenses a la deriva i manté una uniformitat excel·lent del patró d'aspersió. Són els més adequats per als sistemes de regulació PWM.



Figura 16. Broquet Combo-Jet amb preorifici. *Font: www.wilger.net*

2.4 Funcionament d'un polvoritzador de barra

2.4.1 Funcionament general del sistema CPA

Els polvoritzadors hidràulics de barra tenen un objectiu molt clar: transportar el producte fitosanitari barrejat amb aigua que es troba dins el dipòsit fins a la superfície de la planta, a través del broquets situats en la barra. Aquests han de treballar a la pressió necessària per proporcionar el cabal que suposi una dosi correcta de producte per hectàrea de terreny.



Figura 17. Polvoritzador de barra *Kuhn Deltis* realitzant un tractament. Font: <http://www.kuhn.es>

Pel que fa a les màquines amb sistema de regulació de cabal proporcional a l'avançament (CPA), és possible generalitzar bastant el seu procés de funcionament mitjançant el següent diagrama (Fig. 18). No obstant, cal tenir en compte que no totes les màquines del mercat segueixen exactament aquest procés, aquestes poden tenir petites variacions en el sentit que poden incorporar més elements o prescindir-ne (Ex: cabalímetre), però el principi de funcionament en que es basen sempre és el mateix.

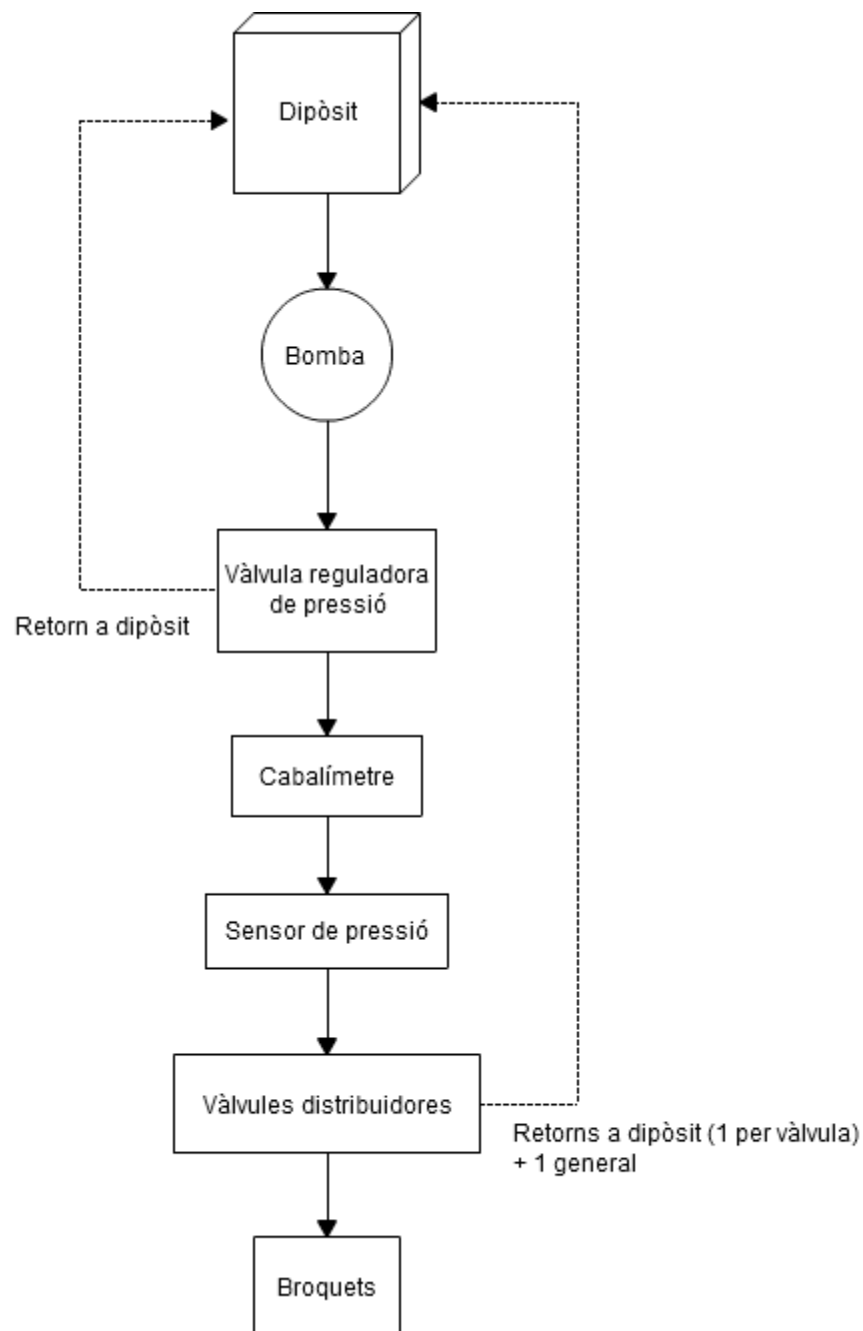


Figura 18. Diagrama de components d'una màquina polvoritzadora de barra amb regulació CPA per pressió.

La preparació fitosanitària que es troba en l'interior del **dipòsit** és extreta de la part inferior d'aquest per mitjà de la **bomba**. Moltes vegades la màquina disposa d'un filtre entre la sortida del dipòsit i l'entrada de la bomba, per tal d'evitar l'arribada de les possibles impureses que contingui el brou emmagatzemat en el dipòsit fins aquesta.

La barreja és impulsada per la bomba, augmentant la pressió a la sortida d'aquesta i conduint el líquid fins la **vàlvula reguladora de pressió**. En aquest punt es produeix la

regulació: el sistema, en funció de la velocitat d'avanç, els trams de barra oberts i la dosi de consigna, calcula la pressió necessària en els broquets, de manera que si la lectura del **sensor de pressió** situat més endavant és superior o inferior a la necessària, obra o tanca la vàlvula reguladora respectivament, permetent el pas de més cabal o menys cap al conducte de retorn al dipòsit. Així doncs, el cabal restant continua cap a les **vàlvules distribuïdores**, juntament amb les quals es troba el sensor de pressió esmentat anteriorment. Cada tram o secció de la barra és comandat per una vàlvula distribuïdora de tot o res, obrint o tancant completament el pas cap a un retorn a dipòsit segons si es vol realitzar o no tractament amb aquell tram concret de la barra.

En cas que la vàlvula distribuïdora permeti el pas del producte, aquest es dirigeix ja finalment fins als **broquets**, on arriba a la pressió necessària per proporcionar el cabal que suposa l'aplicació correcta de la dosi de consigna.

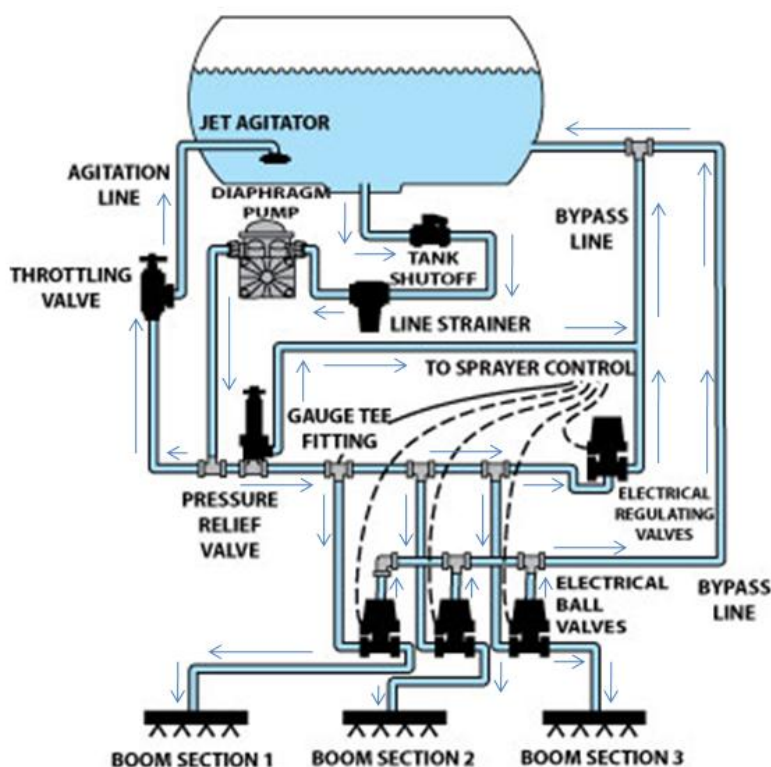


Figura 19. Esquema del funcionament d'un sistema CPA sense cabalímetre de 3 seccions, amb indicacions de les direccions dels cabals. Font: Adaptació pàgina web Teejet (www.teejet.it).

2.4.2 Funcionament general del sistema PWM

Els sistemes de regulació per modulació d'ample de polsos (PWM) opera de forma similar al sistema CPA, de fet en el diagrama de components solsament canvien les vàlvules distribuïdores amb els seus retorns per les vàlvules solenoides muntades sobre cada broquet i el recorregut del producte és el mateix:

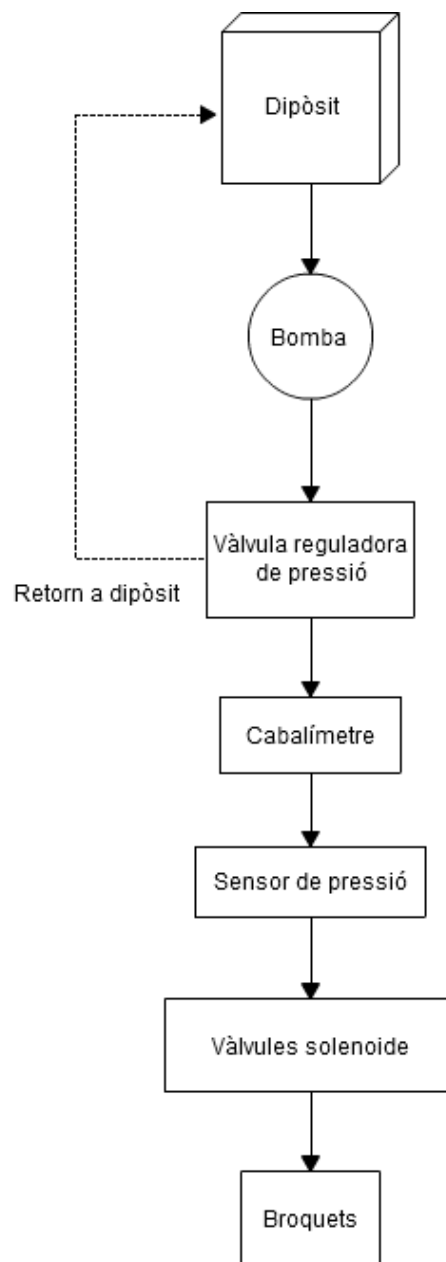


Figura 20. Diagrama de components d'una màquina polvoritzadora de barra amb regulació PWM.

Com s'ha comentat en apartats anteriors, en aquest sistema la pressió de treball de la barra no necessita variar per dur a terme la regulació, de manera que l'usuari fixa un valor què, segons el broquet que duu, li proporciona una mida de gota i un angle d'aspersió correcte. Així doncs, segons la pressió que llegeixi **el sensor** de la barra, si aquesta és més gran o més petita de la desitjada, la **reguladora de pressió** obra o tanca més el pas al retorn al dipòsit, respectivament. En cas de produir-se el tancament d'algunes seccions, entenent aquestes com cadascun dels broquets, la unitat de control interpreta una disminució de l'amplada de treball de la barra, tornant a calcular el cabal necessari per mantenir la dosi amb aquesta nova amplada de treball i ajustant la reguladora, per tal d'evitar l'augment de pressió en la barra.

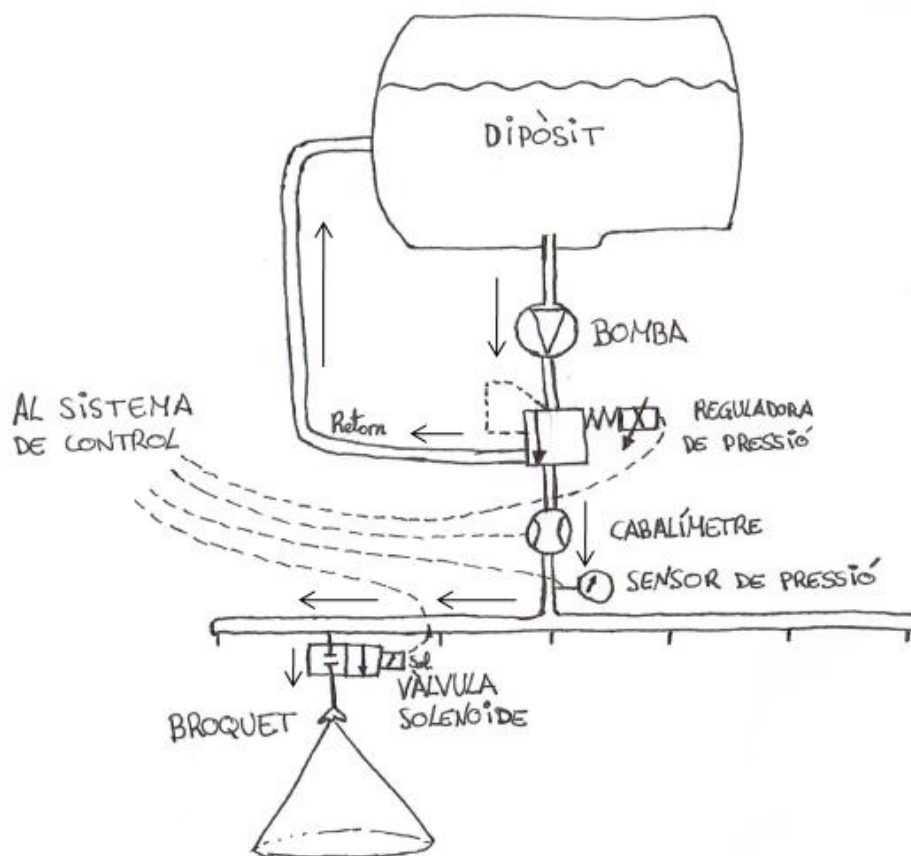


Figura 21. Esquema simplificat del funcionament d'un sistema PWM.

2.4.3 Sistema GPS

Avui en dia qualsevol tractor disposa d'un **sistema GPS** instal·lat que permet, no només conèixer la posició de la màquina en cada moment, sinó també la seva velocitat d'avançament. Conèixer la posició del tractor té una gran importància en treballs que requereixen precisió com és el cas de la polvorització, ja que permet aplicar-se a softwares que controlin la superfície treballada, mostrant per un monitor un mapa aproximat del camp que s'està treballant i les zones per les quals s'ha passat, com es veu en la figura 22:



Figura 22. El software permet mostrar per pantalla la zona treballada per garantir el correcte recobriment del camp. Model de la pantalla: Trimble CFX-750 Font: *Manual Trimble CFX-750*.

Un mètode de regulació molt utilitzat amb la implicació d'aquest software consisteix en una programació prèvia de les dimensions de la barra i dels seus diferents trams. De manera que durant la realització del treball, el programa detecta quan un tram o diversos trams de la barra tornen a entrar dins la superfície que es mostra com a treballada, desactivant-los amb l'objectiu d'evitar una segona passada per la mateixa zona i per tant, un doblament de la dosi aplicada.

També es troba estretament lligat aquest tipus de software amb els sistemes d'autoguiatge. Que consisteix en un control automàtic del tractor a partir d'una

programació prèvia que permet realitzar treballs de precisió sense que el conductor hagi ni tan sols d'agafar el volant.

El que es pretén dir amb això és què, tots aquests sistemes requereixen d'una alta precisió en la mesura de la posició del tractor per part del GPS. En general, un receptor per defecte genera posicions no corregides amb errors de fins a 15 metres del valor real. És evident que aquesta precisió és impermissible per realitzar aquest tipus de treballs. No obstant, aquesta es pot corregir per mitjà de diferents sistemes de correcció, segons quin d'aquests s'utilitzi es poden esperar les següents precisions:

Taula 4. Sistemes de correcció de GPS disponibles. Font: Trimble Agricultura de Precisión y Sistemas de Guiado, de I. Rossi i J. Rifer.

Sistema de correcció	Precisió horitzontal (cm)
OmniSTAR VBS i WAAS/EGNOS	< 100
RangePoint RTX	15
OmniSTAR XP/G2	8-10
OmniSTAR HP	5-10
CenterPoint RTX	< 4
CenterPoint VRS o RTK	< 2,5

Segons el document de I.Rossi i J.Rifer, per dur a terme correctament un treball de polvorització amb sistema ASC (*Automatic Section Control*), seria adequat utilitzar un sistema de correcció OmniSTAR HP, considerant també vàlid, com a mínim, el sistema OmniSTAR XP/G2, és a dir, amb un **error no superior als 10 centímetres**.

Pel projecte que es vol realitzar es considera el mateix criteri en quant a la precisió del sistema de correcció, tenint en compte que la intenció és que el sistema de regulació sigui perfectament compatible amb un sistema ASC també instal·lat, es considera que no és necessària una precisió de sistemes RTX o RTK per la polvorització, degut a que és un tipus de treball on factors com ara el vent o els petits desnivell del terreny, que són variables que no es poden controlar, poden alterar l'exactitud de la dosificació. Per aquest motiu, no es considera necessària la inversió de diners que suposa un sistema més precís amb el qual es poden guanyar 2 o 3 centímetres de precisió quan aquests poden ser perduts fàcilment per altres vies.

En el cas de l'autoguiatge, és necessària l'aplicació d'un sistema RTK, el qual garanteix una precisió d' $1 \text{ cm} \pm 2 \text{ parts per milió (ppm)}$ horitzontalment i $2 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$ verticalment. Això suposa un màxim error absolut de:

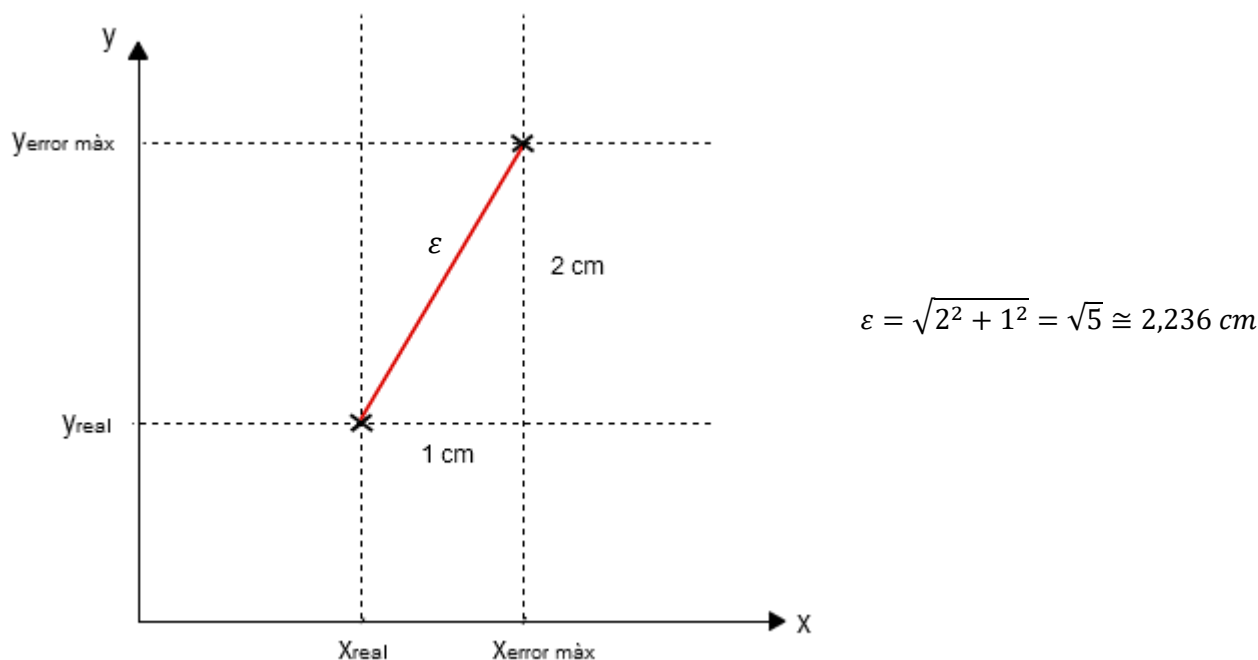


Figura 23. Representació gràfica de l'error absolut màxim (ε) en una mesura amb sistema RTK, les parts per milió de possible error no s'han tingut en compte, degut a que el seu valor és insignificant a l'hora de dur a terme treballs agrícoles.

Els comerciants d'aquest tipus de sistemes garanteixen que tenen una precisió de 2,5 cm, de fet, encara són una mica més precisos $\varepsilon \cong 2,236 \text{ cm}$.

3. Memòria

3.1. En què consisteix la regulació que es vol realitzar?

Resulta evident que durant la realització de qualsevol treball agrícola per mitjà d'un tractor que propulsa una màquina, es duen a terme una varietat de trajectòries que van molt més enllà de les simples línies rectes que 'escombrarien' la superfície del conreu. Ja sigui perquè així ho imposa el sistema de reg (pivot circular o semicircular) o perquè la geometria del tros obliga a realitzar moviments menys ordenats.

En el cas de la polvorització amb barra, el fet de treballar realitzant trajectòries corbes suposa l'aparició, al llarg de la barra, d'una distribució triangular de velocitats que depèn, a cada instant, de la velocitat del punt central i del radi de la trajectòria que suposa el moviment d'aquest, com es pot veure en les figures 24 i 25).

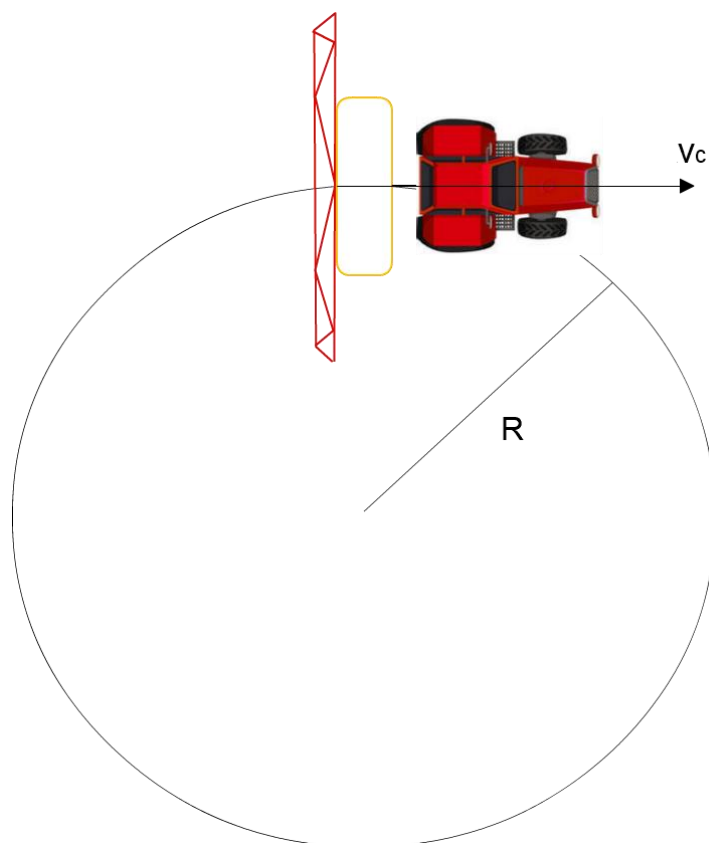
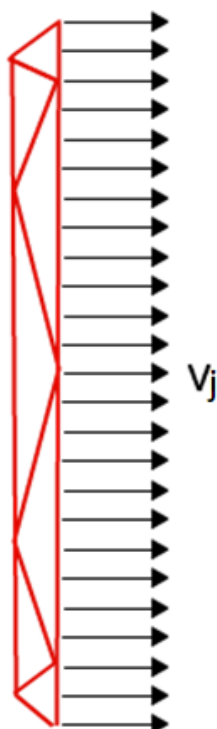


Figura 24. Per un instant determinat es pot considerar que el centre de la barra avança linealment a una velocitat v_c i segueix una trajectòria circular amb una distància R entre el centre de la barra i el centre instantani de rotació (CIR). *Font: Pròpia.*

Si es centra l'atenció en el que succeeix a nivell cinemàtic en la barra durant el viratge:

Trajectòria en línia recta



Trajectòria corba

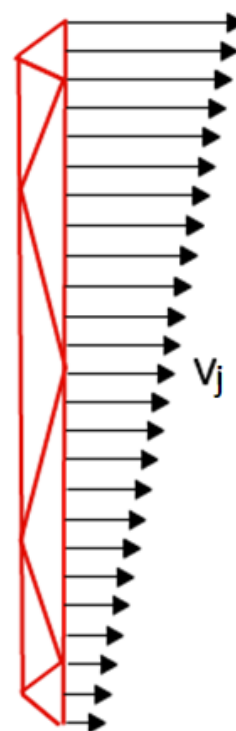


Figura 25. Distribució de velocitats dels diferents punts j de la barra per a una trajectòria en línia recta (esquerra) i per una trajectòria corba (dreta).

S'entén doncs, que perquè el grup tractor-màquina pugui girar com un conjunt, és necessària l'aparició d'aquesta distribució de velocitats en la barra. Com es pot observar, les velocitats dels trams interiors a la corba poden ser molt més baixes que les dels trams exteriors, fins al punt que, si el radi de curvatura és més petit que la meitat de la longitud de la barra, les velocitats entre els dos extrems d'aquesta tindran sentit contrari. És evident que com més llarga sigui la barra, més s'accentua aquest fenomen.

La velocitat en cadascun dels punts de la barra es regeix segons la relació lineal:

$$v_j = \omega \cdot r_j \quad (\text{Eq. 3})$$

On:

v_i : és la velocitat tangencial en un punt de la barra (m/s).

ω : és la velocitat angular del grup tractor-màquina (rad/s).

r_i : és el radi de la corba que traça un punt de la barra (m).

Per estudiar com afecta la velocitat de moviment de la barra a la dosi de tractament aplicat s'utilitza la següent equació:

$$d = \frac{Q}{v_c \cdot L} \cdot \frac{10^4}{60} \quad (Eq. 4)$$

On:

d : és la dosi o quantitat de producte que es vol aplicar (l/ha).

Q : és el cabal de brou que surt pels broquets (l/min).

v_c : és la velocitat del punt central de la barra (m/s).

L : és la longitud de treball de la barra (m).

Es pot observar doncs, que el sistema de regulació de cabal proporcional a l'avançament (CPA) el que fa és regular el cabal Q , variant la pressió a la barra, segons es modifiqui la velocitat de treball v_c o la quantitat de sectors oberts de la barra L , de manera que es mantingui una dosi aplicada d constant.

No obstant, aquest sistema no contempla l'aparició al llarg de la barra, d'una distribució de velocitats en el viratge que realment altera el repartiment de la quantitat de producte aplicat en aquella superfície de treball. Tal i com ho entén aquest sistema, no hi ha cap diferència entre llençar un cabal Q a una velocitat d'avanç v_c durant una distància x , sigui aquesta última recorreguda en línia recta o en corba. Realment, segon l'equació 4, així és, ja que s'ha llençat la mateixa quantitat de litres de producte en la mateixa superfície, de manera que, teòricament, la dosi aplicada ha estat la mateixa. El que realment ha passat és que, en els trams interiors a la corba, al haver-hi unes velocitats tangencials més baixes, s'ha aplicat una quantitat més elevada de la que es pretén, que es veu compensada amb la quantitat aplicada pels trams exteriors a la corba, menor de la que es pretén, degut a que les velocitats en aquests trams són més elevades (Figura 26).

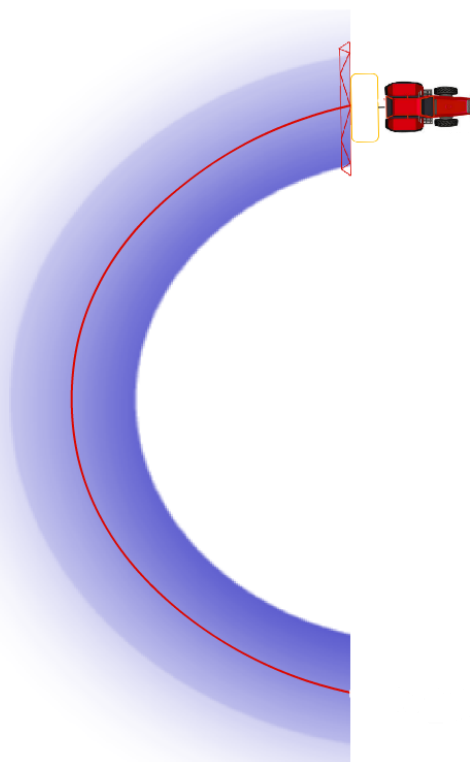


Figura 26. En les corbes, la distribució de diferents velocitats que apareix en la barra suposa una aplicació no uniforme del producte.

Resulta, doncs, que en una part s'ha aplicat una quantitat massa elevada que pot generar problemes mediambientals, mentre que en l'altra part, la quantitat aplicada podria no ser suficient per a realitzar un correcte tractament.

Per tal d'evitar aquest fenomen, és necessari el disseny d'un **sistema de regulació per trams**, o per zones de la barra, de manera que sigui possible adequar el cabal que subministra cadascuna en funció de la seva pròpia velocitat tangencial a la corba traçada, augmentant així la homogeneïtat de l'aplicació del producte, com es veu en la figura 27:

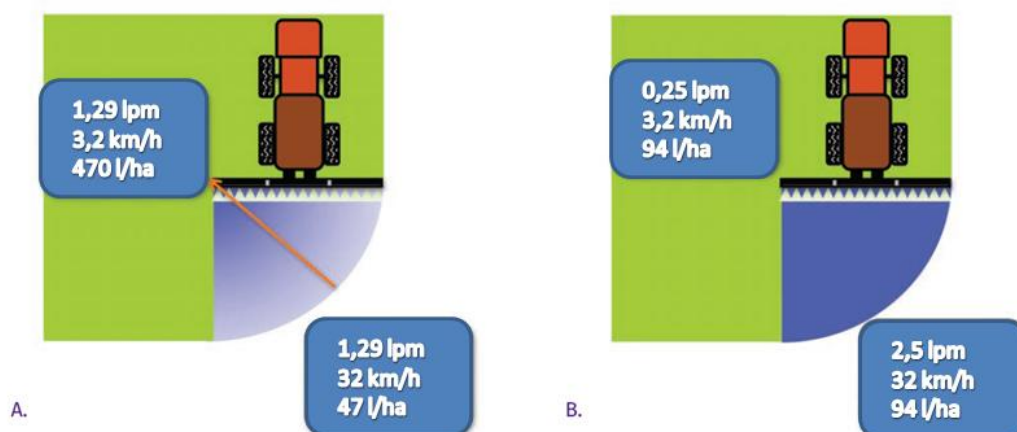


Figura 27. Una correcta regulació del cabal de cada broquet, segons la seva posició en la barra, permet una aplicació homogènia del producte en trajectòries corbes. Els quadres de la imatge A indiquen els valors de cabal, velocitat i dosi aplicada pels broquets dels extrems de la barra sense cap regulació mentre que els de la imatge B mostren les dades en un sistema que sí que la realitza. Font: *Adaptació de Pulse Width Modulated (PWM) Technology for Liquid Application*, de A. Sharda et al.(2016).

3.2. Efecte del seccionament de la barra

La divisió de la barra de pulverització en diferents trams permet evitar el doblament de la dosi aplicada en zones on ja s'havia realitzat una passada, sense necessitat de modificar la trajectòria de treball. Això és possible gràcies al sistema de control del tancament de les diferents seccions. No sols això, sinó que en cas de poder regular el cabal de sortida de cada secció, també es pot reduir l'error d'aplicació en les trajectòries corbes, de manera que disminueix l'aparició de zones amb aplicació excessiva i zones amb aplicació insuficient.

En la figura 28 es pretén mostrar un model matemàtic d'aquesta reducció segons s'augmenta el nombre de seccions de la barra, les gràfiques indiquen la desviació (Δd) entre la dosi aplicada i la dosi que s'hauria d'aplicar al llarg de la longitud de la barra (L) segons el nombre de divisions (seccions) que es fa de la barra.

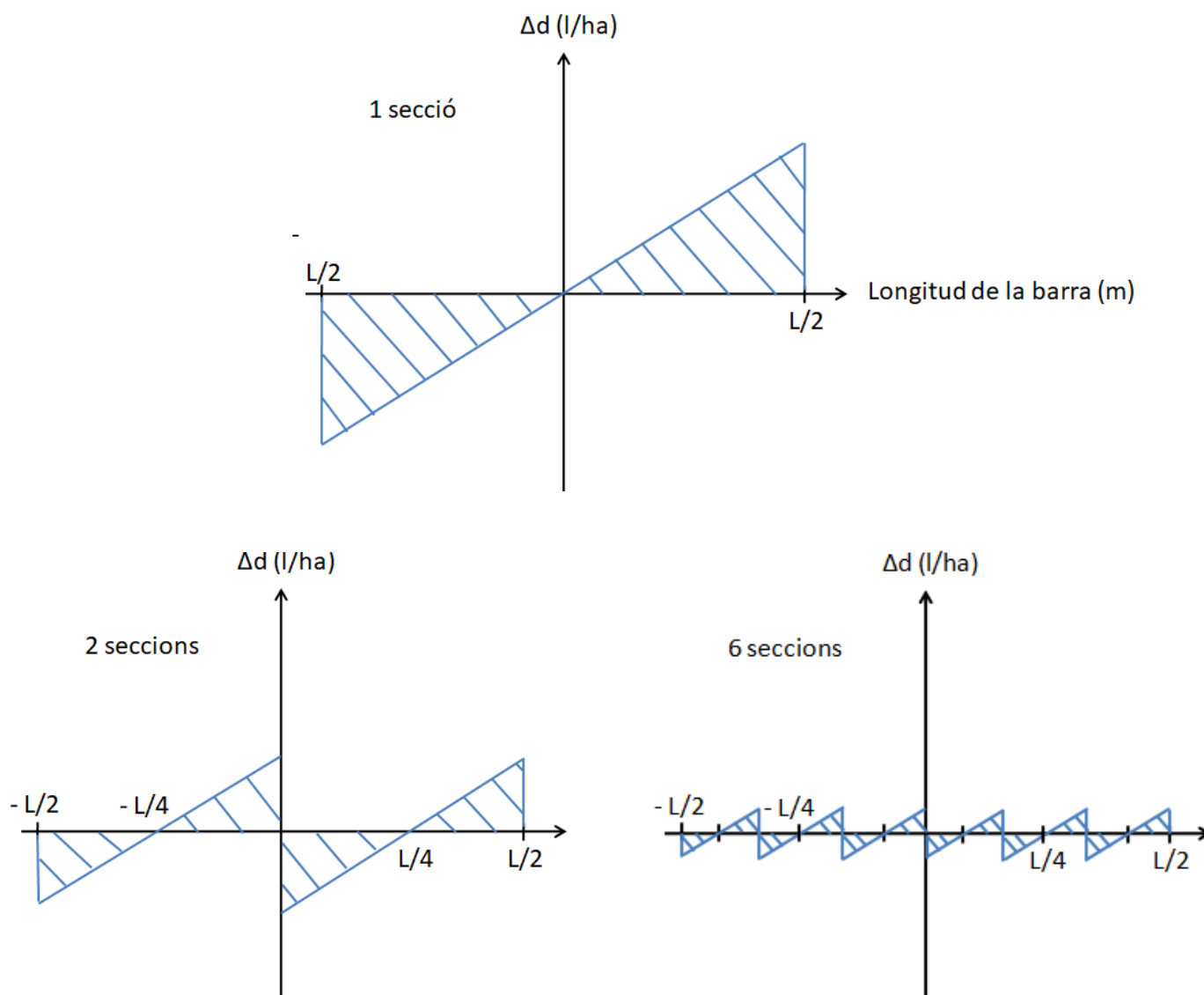


Figura 28. Representació de la desviació en la dosi aplicada (Δd) al llarg de la longitud de la barra per 3 casos diferents: amb una secció reguladora (dalt), amb dues (baix-esquerra) i amb sis (baix-dreta). S'observa fàcilment la reducció d'error en l'aplicació a mesura que augmenta el nombre de divisions de la barra. La inclinació de les línies que representen la distribució en un tram és representativa, el valor d'aquesta inclinació augmentaria a mesura que es redueix el radi de gir de la traçada del tractor.

Es pot considerar, doncs, l'àrea marcada sota les corbes com una representació del volum de producte aplicat de manera incorrecta, ja sigui per una dosi excessiva (àrea per sobre l'eix d'abscisses), com per una dosi insuficient (àrea per sota de l'eix d'abscisses). Existeix una relació entre aquest error i el nombre de seccions regulades de la barra que s'escriuria:

Per 1 secció:

$$A_1 = 2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{h}{2} = \frac{L \cdot h}{2}$$

Per 2 seccions:

$$A_2 = 4 \cdot \frac{L}{4} \cdot \frac{h}{4} = \frac{L \cdot h}{4}$$

Per 6 seccions:

$$A_6 = \frac{L \cdot h}{12}$$

S'observa doncs, què:

$$A_n = \frac{L \cdot h}{2 \cdot n} \quad (Eq.5)$$

On:

L : És la longitud de la barra en metres (m).

h : És la desviació màxima de dosi aplicada quan la barra és una sola secció, en (l/ha).

n : És el nombre de seccions regulades en què es divideix la barra.

S'observa que la reducció d'aquesta àrea segueix una relació lineal, de manera que com més gran és el nombre de seccions de la barra (n) més petita és la desviació de la dosi aplicada.

$$\frac{A_n}{A_1} = \frac{1}{n} \quad (Eq.6)$$

El màxim seccionament que es pot aplicar en una barra pulveritzadora és que cada broquet representi una secció, com fan els sistemes PWM. D'aquesta manera, segons l'equació 6, es pot saber que en una barra de 30 metres, amb 61 broquets separats 0,5 metres entre ells, es pot reduir l'error en l'aplicació un **98,36%** respecte una barra amb una sola secció regulable.

Una altra manera de veure-ho és que, per cada litre de producte mal aplicat amb un sistema PWM que reguli independentment cadascun dels 61 broquets, equivaldria a 61 litres mal aplicats per un sistema sense regulació per seccions, el qual suposa una diferència de 60 litres. Ara bé, suposant que s'augmenti el període treballat fins haver realitzat una aplicació incorrecta de 50 litres amb el sistema PWM, el sistema sense seccions hauria aplicat malament 3.050 litres, de manera que existeix una diferència de 3.000 litres que haurien estat aplicats amb una dosi incorrecta.

Per traduir aquesta quantitat de producte a valor econòmic, si per exemple el treball que es realitza és l'aplicació de la barreja d'insecticides *Clorpirifos* + *Cipermetrina*, el seu preu és d'uns 0,075€ per litre de caldo, de manera que 3.000 litres suposen un preu de 225€ en producte que s'aplica fora de la dosi sense el sistema de regulació. Cal destacar que aquests diners el pagès no se'ls estalvia directament, ja que la quantitat de producte que s'aplica en el tros es la mateixa, no obstant el repartiment d'aquest és molt millor amb el sistema PWM, de manera que el benefici s'obté en el moment de la collita, on un tros amb un millor tractament fitosanitari generarà uns beneficis superiors a un pitjor tractat.

3.3. Elecció del sistema adequat per dur a terme la regulació

És important partir de la base que cap sistema que permeti regular el cabal per diferents seccions de la barra és barat, fins al punt que l'elecció de quin d'aquests és més adequat pot dependre bàsicament del poder adquisitiu del comprador. En aquest treball s'intenta donar major importància a la part tecnològica i d'enginyeria d'aquest tipus de màquines.

Bàsicament es consideren viables dos sistemes:

- El primer consisteix en una **regulació proporcional a l'avançament (CPA)** amb tantes vàlvules reguladores de pressió com nombre de seccions tingui la barra, a més de la general. Aquest sistema té una limitació molt important, i és que per variar el cabal requereix variar la pressió. Així doncs, la vàlvula general ha de donar la pressió necessària perquè el broquet central del tram que es desplaça a més velocitat en la corba (exterior), subministri el cabal necessari per la correcta aplicació. La resta de seccions s'ajusten als seus cabals (menors que el del tram exterior) amb les seves

corresponents reguladores. Resulta evident que la pressió general màxima té un límit, no hauria de superar mai els 8 bar, sinó l'aspersió que produeix el broquet no serà correcta i el sistema tindrà un efecte més perjudicial que beneficis.

Un altre inconvenient d'aquest sistema és que un nombre elevat de seccions implica un gran nombre de vàlvules reguladores de pressió, i el preu de cada una d'aquestes oscil·la entorn els 450 €, augmentant molt el cost total del muntatge.

- El segon es tracta d'un sistema de **regulació per ample de polsos (PWM)** amb vàlvules solenoide muntades en cada broquet i que permeti la regulació del **cicle de treball o Duty Cycle (DC)** de cadascun segons la seva posició en la barra respecte la corba. Aquest és un sistema força car, però tecnològicament és el que reuneix les millors condicions per dur a terme una regulació d'aquest tipus. Els avantatges que presenta respecte l'altre sistema són:

- Control individualitzat de cada broquet, dividint la barra en tantes seccions com nombres de broquets hi hagi.
- Permet mantenir una **pressió de treball constant** en la barra, establint aquesta en un valor amb que el broquet produeixi una mida de gota correcta i un arc d'aspersió idoni.
- Varia el cabal que surt pels broquets a partir del cicle de treball de la vàlvula solenoide, això permet obtenir uns rangs de cabals major. Per exemple, augmentant la velocitat en un factor de 2, el cabal que ha de proporcionar la màquina també ha de ser el doble, això requeriria un augment de la pressió de factor 4, degut a la relació quadràtica de les corbes Pressió-Cabal dels broquets. Així doncs, considerant un sistema que pot treballar entre 2 i 6 bar, el màxim factor d'augment que es podria obtenir és de 1,73.

En canvi, un sistema PWM que permeti variar el cicle de treball d'un 20% fins al 100% proporciona un factor d'augment del cabal de 5.

També és cert que el sistema no és del tot perfecte i el fet de regular a partir d'obrir i tancar una vàlvula afecta negativament al rendiment del broquet. Per això és recomanable utilitzar un tipus de broquets especials amb preorifici o d'arc pla amb rang estès.

A la pràctica, en cicles de treball baixos la mida de la gota augmenta i es redueix lleugerament l'angle d'aspersió. Això afecta lleugerament a la qualitat del tractament, però molt menys que en un sistema de regulació per pressió.

Com s'ha comentat anteriorment, en base a la viabilitat física i tecnològica, resulta força clar que el sistema ideal per dur a terme la regulació per seccions d'aquest projecte és el sistema de **regulació per ample de polsos (PWM)**. Aquest suposa una sèrie d'avantatges respecte la regulació per pressió que permeten obtenir rendiments de polvorització molt més elevats. Per aquest motiu es pot entendre el cost del sistema com una inversió recuperable a baix/mig termini, segons l'ús que es faci de la màquina en qüestió.

El sistema *PWM* es tracta d'un sistema força simple i és perfectament incorporable en polvoritzadors hidràulics amb sistema de regulació per pressió proporcional a l'avançament (CPA), que són la gran majoria de les màquines del mercat.

El fet de permetre un gran seccionament de la barra resulta, com s'ha vist en l'apartat 3.2, en una distribució molt millor del producte aplicat a la parcel·la, millorant així la qualitat del cultiu i augmentant-ne els beneficis. Però això no és tot, ja que evitar les aplicacions excessives de producte també suposa un benefici pel medi ambient, per que d'aquesta manera s'evita l'aplicació de dosis excessives que puguin afectar a altres espècies i es redueix la quantitat de producte fitosanitari que es filtra de la terra fins arribar a les aigües del nivell freàtic, on la capacitat d'afectació a altres espècies i fins i tot a les persones és molt elevada.

3.4. Modelització del sistema de regulació PWM

3.4.1. Càlcul del cabal de cada broquet

Per a poder realitzar una aplicació uniforme en tota la superfície del tros amb un polvoritzador hidràulic de barra, el cabal que surt per cada broquet s'ha d'adaptar a la distribució de velocitats que apareix en la barra durant els girs (veure apartat 3.1).

El cabal que surt per cada broquet ve definit per:

$$Q_j = f(d, v_c, R, s, j)$$

On:

d : És la dosi o quantitat de producte per superfície treballada que es vol aplicar.

v_c : És la velocitat del punt central de la barra.

R : És el radi de gir de la trajectòria de la barra.

s : És el sentit de gir angular del tractor, vulgarment parlant seria si el tractor gira cap a l'esquerra o cap a la dreta.

j : Indica la posició del broquet en la barra, veient la màquina des de darrere, la posició 1 correspondria al broquet de l'extrem esquerra de la barra. La posició n seria el broquet de l'extrem oposat, sent n el nombre total de broquets:

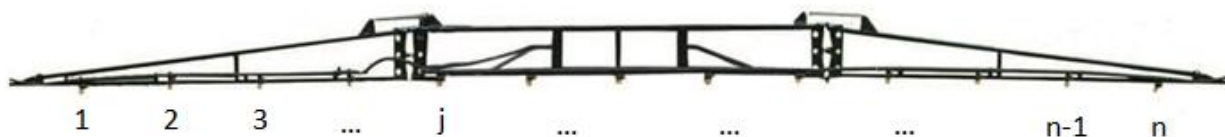


Figura 29. Sistema de numeració dels broquets muntats en la barra.

Com es pot observar, excepte la dosi de consigna (d), la resta de variables de les que depèn el cabal de cada broquet són de caràcter cinemàtic, és a dir, que defineixen el moviment que està realitzant la barra. Més concretament, defineixen la velocitat (v_j) amb què s'està movent cadascun dels broquets:

$$v_j = f(v_c, R, s, j)$$

Per tant:

$$Q_j = f(d, v_j)$$

Per determinar la distribució de velocitats dels broquets de la barra (v_j) és necessari conèixer la velocitat del punt central (v_c), que s'obté directament del GPS i el radi de curvatura de la traçada de cada broquet (r_j). Aquestes variables es troben relacionades entre sí per la velocitat angular de la barra (ω) (veure equació 3).

Es plantegen dos mètodes diferents per determinar el radi de gir de la traçada del tractor i la velocitat angular de la barra a partir de les diferents dades que es poden obtenir del receptor GPS:

- El mètode d'ajust circular de diversos punts.
- El mètode de regressió lineal de valors d'orientació respecte el Nord geogràfic.

3.4.1.1. Comparació dels mètodes per calcular la trajectòria circular del tractor

Quan es parla de la trajectòria circular del tractor es fa referència al radi de la circumferència que aquest recorre i a la seva velocitat angular de gir respecte un eix perpendicular a la superfície de la terra.

A continuació s'expliquen els dos mètodes matemàtics plantejat per al càlcul de les variables esmentades:

- **Mètode d'ajust circular de diversos punts ('CIRCLE FIT')**

Definició del problema: Donat un conjunt de punts $\langle x_i, y_i \rangle$ en \mathbb{R}^2 , determinar el cercle de centre en (x_o, y_o) i radi R que millor s'hi ajusta. Com es pot veure en la figura 30:

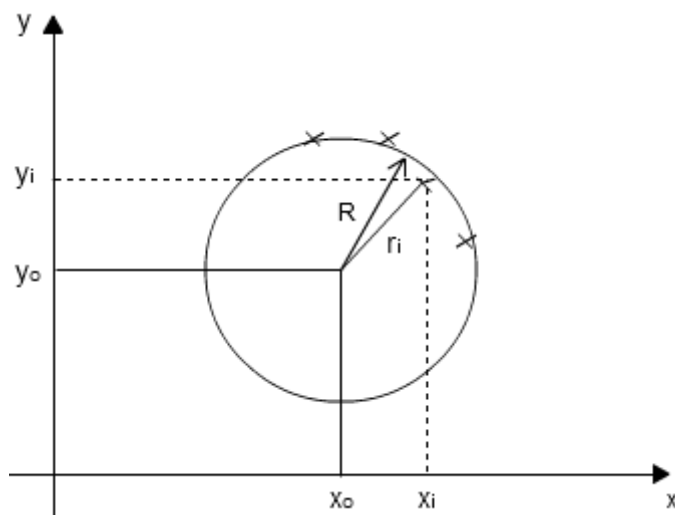


Figura 30. Representació gràfica del problema d'ajust d'una circumferència a partir d'un conjunt de punts $\langle x_i, y_i \rangle$.

Criteri d'ajust: Minimització de la suma d'errors quadràtics:

$$F(x_o, y_o, R) = \sum_i [(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 - R^2]^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

La minimització de F es pot obtenir imposant que $\frac{\partial F}{\partial x_o} = 0$; $\frac{\partial F}{\partial y_o} = 0$; $\frac{\partial F}{\partial R} = 0$, però aquest és un sistema d'equacions no lineals.

La següent transformació de variables permet arribar a un sistema d'equacions lineals.

$$\begin{aligned}
 (x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 - R^2 &= x_i^2 + x_o^2 - 2 \cdot x_o \cdot x_i + y_i^2 + y_o^2 - 2 \cdot y_o \cdot y_i - R^2 = \\
 &= x_i^2 + x_o^2 - \underbrace{2 \cdot x_o}_{\mathbf{A}} \cdot x_i - \underbrace{2 \cdot y_o}_{\mathbf{B}} \cdot y_i - \underbrace{(R^2 - x_o^2 - y_o^2)}_{\mathbf{C}}
 \end{aligned}$$

$$(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 - R^2 = x_i^2 + x_o^2 - \mathbf{A} \cdot x_i - \mathbf{B} \cdot y_i - \mathbf{C} \quad (\text{Eq. 8})$$

Éssent:

$$A = 2 \cdot x_o$$

$$B = 2 \cdot y_o$$

$$C = R^2 - x_o^2 - y_o^2$$

$$\left. \begin{aligned} A &= 2 \cdot x_o \\ B &= 2 \cdot y_o \\ C &= R^2 - x_o^2 - y_o^2 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} x_o &= \frac{A}{2} \\ y_o &= \frac{B}{2} \\ R &= \sqrt{x_o^2 + y_o^2 + C} = \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{B^2}{4} + C} = \frac{\sqrt{A^2 + B^2 + 4C}}{2} \end{aligned} \quad \begin{aligned} &(\text{Eq. 9}) \\ &(\text{Eq. 10}) \\ &(\text{Eq. 11}) \end{aligned}$$

Lavors la funció objectiu queda com una funció de les tres variables A , B i C , i les derivades parcials constitueixen un sistema d'equacions lineals.

$$F(A, B, C) = \sum_i (x_i^2 + y_i^2 - A \cdot x_i - B \cdot y_i - C)^2 \quad (Eq. 12)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial F}{\partial A} = \sum_i \frac{\partial}{\partial A} (x_i^2 + y_i^2 - A \cdot x_i - B \cdot y_i - C)^2 = \\ &= \sum_i 2(x_i^2 + y_i^2 - A \cdot x_i - B \cdot y_i - C) \cdot (-x_i) \end{aligned}$$

$$\boxed{A \sum_i x_i^2 + B \sum_i (x_i \cdot y_i) + C \sum_i x_i = \sum_i (x_i^2 \cdot y_i^2) \cdot x_i} \quad (Eq. 13)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial F}{\partial B} = \sum_i \frac{\partial}{\partial B} (x_i^2 + y_i^2 - A \cdot x_i - B \cdot y_i - C)^2 = \\ &= \sum_i 2(x_i^2 + y_i^2 - A \cdot x_i - B \cdot y_i - C) \cdot (-y_i) \end{aligned}$$

$$\boxed{A \sum_i (x_i \cdot y_i) + B \sum_i y_i^2 + C \sum_i y_i = \sum_i (x_i^2 \cdot y_i^2) \cdot y_i} \quad (Eq. 14)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial F}{\partial C} = \sum_i \frac{\partial}{\partial C} (x_i^2 + y_i^2 - A \cdot x_i - B \cdot y_i - C)^2 = \\ &= \sum_i 2(x_i^2 + y_i^2 - A \cdot x_i - B \cdot y_i - C) \cdot (-1) \end{aligned}$$

$$\boxed{A \sum_i x_i + B \sum_i y_i + C \cdot n = \sum_i (x_i^2 \cdot y_i^2)} \quad (Eq. 15)$$

Les equacions 13, 14 i 15 es poden expressar en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \sum_i x_i^2 & \sum_i (x_i \cdot y_i) & \sum_i x_i \\ \sum_i (x_i \cdot y_i) & \sum_i y_i^2 & \sum_i y_i \\ \sum_i x_i & \sum_i y_i & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i (x_i^2 \cdot y_i^2) \cdot x_i \\ \sum_i (x_i^2 \cdot y_i^2) \cdot y_i \\ \sum_i (x_i^2 \cdot y_i^2) \end{bmatrix} \quad (Eq. 16)$$

Resolent l'equació matricial 16 s'obtenen els valors del termes A , B i C . Finalment aquests es transformen en les variables $\langle x_o, y_o, R \rangle$ que determinen la circumferència a través de les equacions 9,10 i 11.

S'ha desenvolupat una rutina de MATLAB per resoldre aquest problema, el codi s'adjunta en l'Annex 7.1.10. i a continuació es mostra el resultat obtingut de l'ajust de les següents dades:

Taula 5. Conjunt de punts introduïts en la rutina MATLAB de l'ajust circular ('circlefit').

Nº de punt	Coordenada X	Coordenada Y
1	12	8
2	13	7
3	16	6
4	17	4
5	18	3
6	19	1

L'execució del programa proporciona els següents resultats:

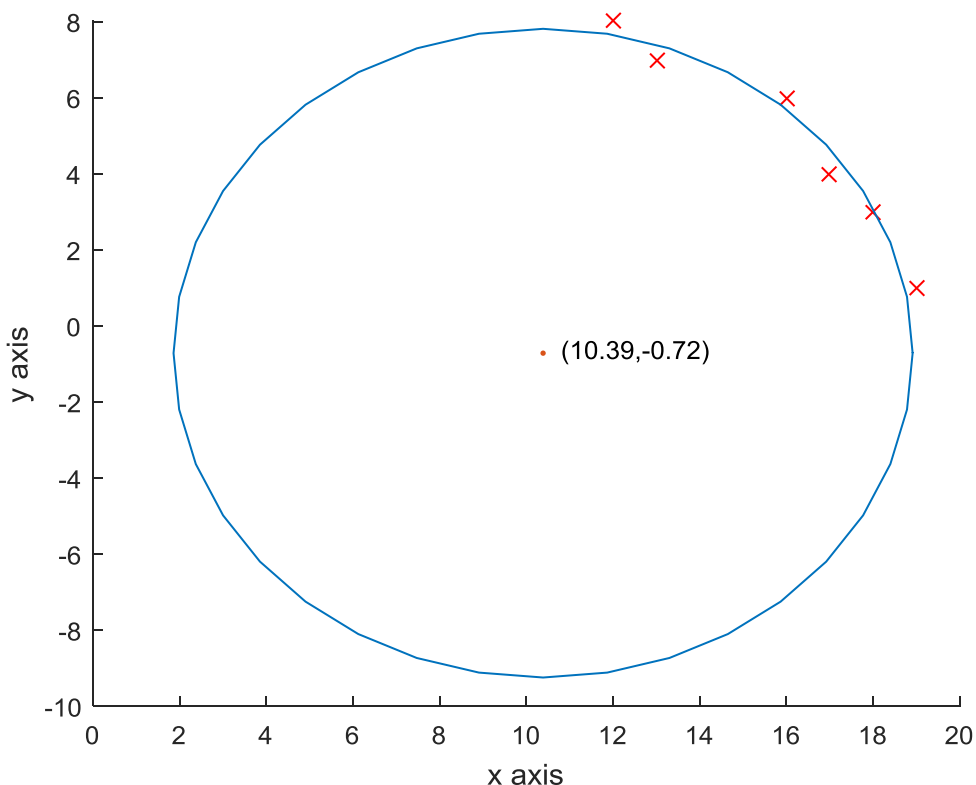


Figura 31. Representació gràfica de la circumferència obtinguda per l'ajust circular dels punts de la taula 6. (marcats amb creus). El centre es troba en el punt (10.39,-0.72) i el radi és de 8.53 u.

- **Aplicació en el projecte:**

Amb el sistema es munta un GPS en el centre de la barra polvoritzadora que permet determinar el posicionament d'aquesta en diversos instants de temps, de manera que la circumferència representa un ajust de la traçada del punt central de la barra. Així doncs, a partir de diverses mesures de posició obtingudes del receptor GPS en coordenades UTM* es determina aproximadament el radi de la circumferència de gir del punt central de la barra (r_c).

Un cop obtingut el radi de gir, a partir de la velocitat mesurada pel GPS (lògicament també del punt central de la barra) v_c , es pot determinar la velocitat angular de gir d'aquesta (ω) segons l'equació 3, amb les dades del broquet central.

S'ha realitzat una simulació amb el software MATLAB de l'ajust que realitza aquest sistema d'una circumferència de 100 metres de radi a partir de coordenades UTM obtingudes amb el software SIGPAC. Per fer-ho s'ha dibuixat una circumferència d'aquestes dimensions i s'han agafat 10 punts consecutius. Partint d'un primer i, considerant una velocitat d'avançament de 3,5 m/s (12,6 km/h) per sobre de la circumferència, amb intervals de temps de 0,2 segons durant 2 segons, s'han anat seleccionant cada punt corresponent a un final d'interval, tal i com es mostra en la figura 32.

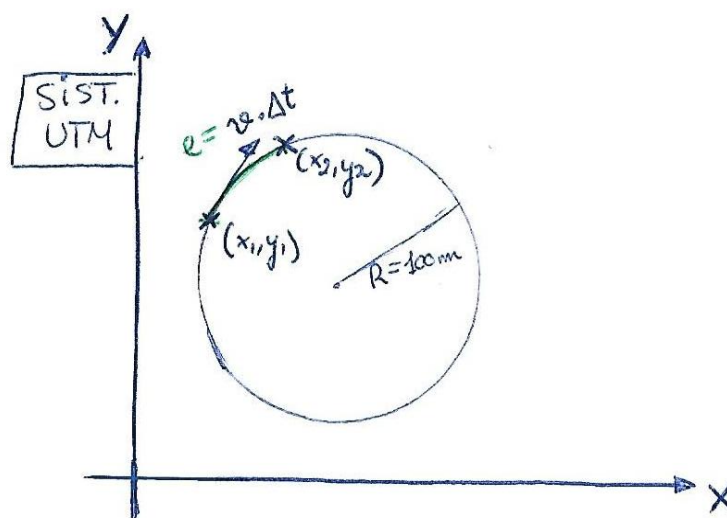


Figura 32. Representació del procés de selecció de les dades del SIGPAC.

Així doncs les coordenades dels punts seleccionats per la simulació són:

Taula 6. Coordenades dels punts seleccionats en el software SIGPAC per dur a terme la simulació de l'ajust d'una circumferència de 100 metres.

Nº de punt	Coordenada X	Coordenada Y
1	282.595,72	4.623.256,14
2	282.595,73	4.623.257,88
3	282.595,78	4.623.259,63
4	282.595,86	4.623.261,37
5	282.595,96	4.623.263,12
6	282.596,10	4.623.264,86
7	282.596,27	4.623.266,59
8	282.596,47	4.623.268,33
9	282.596,69	4.623.270,06
10	282.596,95	4.623.271,78

Una altra fet que s'ha tingut en compte en la simulació és l'error associat al GPS, per fer-ho s'ha generat en cada mesura un error més petit o igual que el possible error de mesura del GPS (s'ha considerat de 20 centímetres), simulant així l'existència d'aquest sobre unes coordenades que correspondrien a una circumferència exacta de 100 metres de radi. Els resultats obtinguts són els següents:

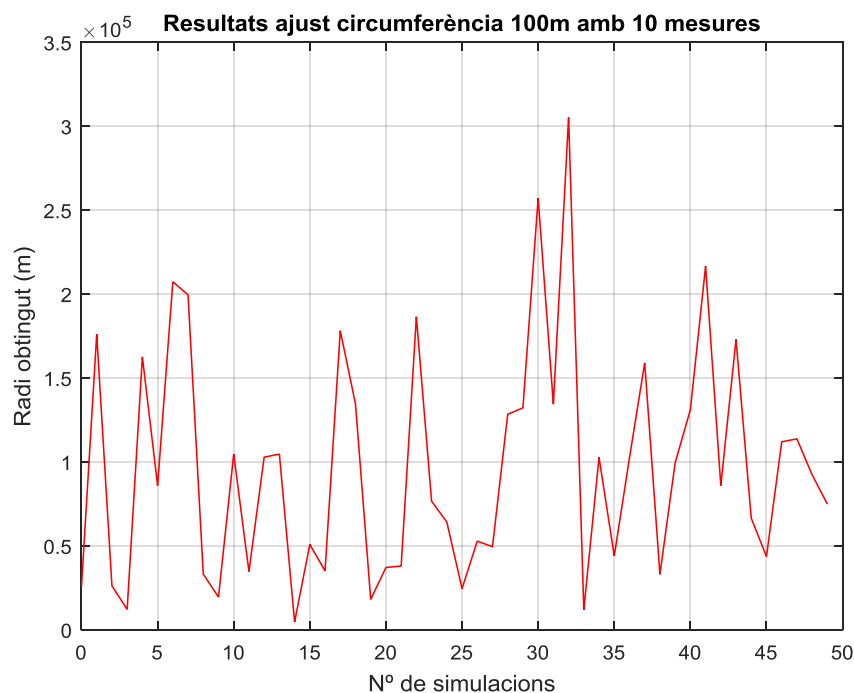


Figura 33. Resultats obtinguts de la simulació de l'ajust d'una trajectòria de 100m de radi amb el mètode de l'ajust circular.

El resultat de la simulació han set una sèrie de circumferències sense cap sentit, amb radis des de 5 metres fins a 300.000. Això és degut a què si els punts es troben molt junts, com seria el cas de la sèrie de mesures obtingudes del GPS en 1 segon quan la barra gira en una circumferència de 100 metres, són quasi bé una línia recta, de manera que les circumferències que s'hi ajusten correctament poden tenir el centre en qualsevol posició i, per tant, qualsevol radi. Una manera de solucionar aquest problema seria augmentar el interval de temps entre les mesures, de manera que aquestes quedin més separades i indiquin més clarament la trajectòria, no obstant això suposa més temps per obtenir les dades d'entrada necessàries pel programa i, per tant, més temps entre un cicle de regulació i el següent, de manera que la precisió també es veu perjudicada en aquest sentit. Per aquest motiu aquest mètode es considera incorrecte i es descarta.

***coordenades UTM:** Sistema de coordenades universal transversal de Mercator, està basat en la projecció cartogràfica transversa de Mercator, que permet expressar coordenades geogràfiques en eixos X i Y (amb metres) sobre la projecció plana esmentada.

- **Mètode de regressió lineal de valors d'orientació respecte el Nord geogràfic.**

Definició del problema: Donades varies mesures d'orientació respecte al Nord o rumb ($\theta(^{\circ})$) en diferents instants de temps t_i , determinar la velocitat angular (ω) de l'objecte en rad/s que més s'ajusti a la real, mitjançant una aproximació lineal:

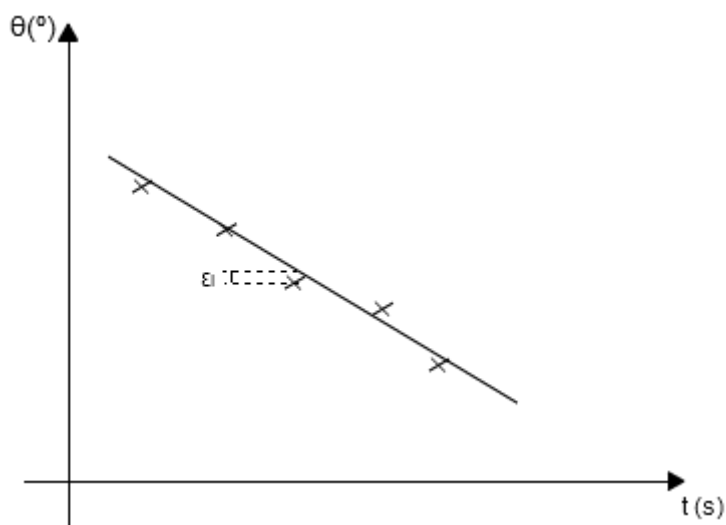


Figura 34. Representació gràfica de l'ajust per regressió lineal d'unes mesures d'orientació en determinats instants de temps. La recta resultant de l'ajust és: $\hat{\theta}(t) = \dot{\theta} \cdot t + \hat{\theta}_o$.

Criteri d'ajust: Minimització de la suma d'errors quadràtics:

$$F = \sum_i (\theta_i - \hat{\theta}_o - \dot{\theta} \cdot t_i)^2 \quad (Eq. 17)$$

On:

θ_i : Són els valors de les diferents mesures d'orientació realitzades.

$\hat{\theta}_o$: És el valor d'angle en que la recta de regressió talla l'eix de les ordenades.

$\dot{\theta}$: És el pendent de la recta de regressió, és a dir, la velocitat angular aproximada del cos.

La minimització de F es pot obtenir imposant que $\frac{\partial F}{\partial \hat{\theta}_o} = 0$; $\frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}} = 0$.

Així doncs, tenim:

$$0 = \frac{\partial F}{\partial \hat{\theta}_o} = -2 \cdot \sum_i (\theta_i - \hat{\theta}_o - \dot{\theta} \cdot t_i)$$

$$\boxed{\sum_i \theta_i = \hat{\theta}_o \cdot n + \dot{\theta} \sum_i t_i} \quad (Eq. 18)$$

$$0 = \frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}} = -2 \cdot \sum_i (\theta_i - \hat{\theta}_o - \dot{\theta} \cdot t_i) \cdot t_i$$

$$\boxed{\sum_i \theta_i \cdot t_i = \hat{\theta}_o \sum_i t_i + \dot{\theta} \sum_i t_i^2} \quad (Eq. 19)$$

Les equacions 18 i 19 s'anomenen 'equacions normals de la recta de regressió'.

Resolent aquest sistema s'obté:

$$\boxed{\hat{\theta}_o = \bar{\theta} - \dot{\theta} \cdot \bar{t}} \quad (Eq. 20)$$

$$\boxed{\dot{\theta} = \frac{\sum_i (\theta_i - \bar{\theta})(t_i - \bar{t})}{\sum_i (t_i - \bar{t})^2}} \quad (Eq. 21)$$

On:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_i \theta_i}{n} \quad (Eq. 22)$$

$$\bar{t} = \frac{\sum_i t_i}{n} \quad (Eq. 23)$$

Finalment s'ha de convertir $\dot{\theta}$ ($^{\circ}/s$) en ω (rad/s):

$$\omega = \frac{\pi}{180} \cdot \dot{\theta} \quad (Eq. 24)$$

S'ha desenvolupat una rutina MATLAB que es troba adjunta en l'Annex 6.1.3 i que permet resoldre aquests problemes. En ella ha estat necessari afegir una funció correctora de les dades d'entrada degut a què per mesurar l'angle d'orientació del tractor respecte el Nord geogràfic, concepte al qual s'anomena rumb o '*heading*' amb anglès, s'utilitza el següent criteri:

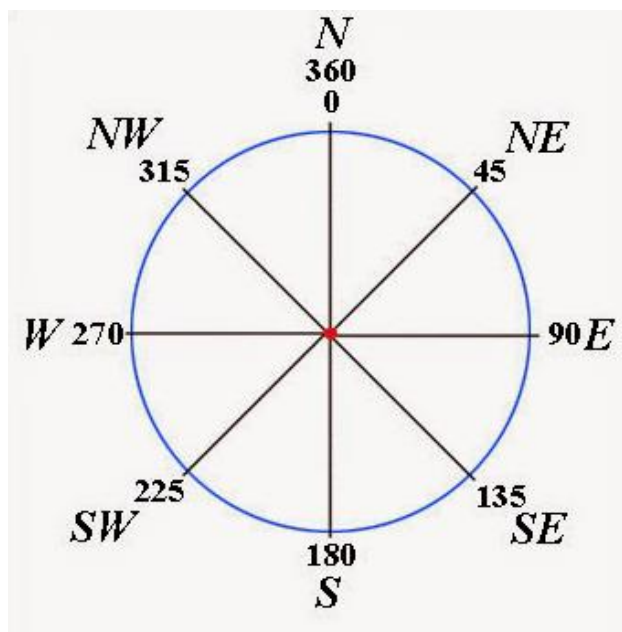


Figura 35. Rosa d'orientació que indica el criteri de la mesura del rumb. *Font:* <http://outdoorquest.blogspot.com.es>

Quan es produeix una sèrie de mesures en la qual, una part d'aquestes es troben en el quadrant NW i l'altra part en el NE, es perd la linealitat de les mesures degut a que la direcció Nord és alhora 0° i 360°. Per exemple, si la tercera mesura d'una sèrie indica un rumb de 358° i la quarta indica 1°, calculant la diferència amb una simple resta el resultat què s'obté és que s'han recorregut -357°, és a dir, 357° en el sentit de les agulles del rellotge, quan en realitat s'han recorregut només 3° i ha estat en sentit contrari. Per això la correcció que es realitza en les dades d'entrada consisteix en fer la resta entre una mesura i la anterior, de manera que si la diferència entre aquestes (en valor absolut) és major de 180°, es resta 360° a les mesures anteriors o posteriors a la de la diferència, segons si el signe d'aquesta és negatiu o positiu respectivament.

Per exemple, donades les següents dades de rumb: **TH=(356,358,0,2)°**

Es realitzen les diferències entre els termes i s'emmagatzemen en el vector DIF, de longitud $4-1=3$:

$$\mathbf{DIF}=(2,-358,2)^{\circ}$$

El valor absolut del segon terme és més gran que 180° i el seu signe es negatiu, per tant es resten 360° de la posició 2 cap enrere del vector TH. I ara la regressió lineal ja té sentit:

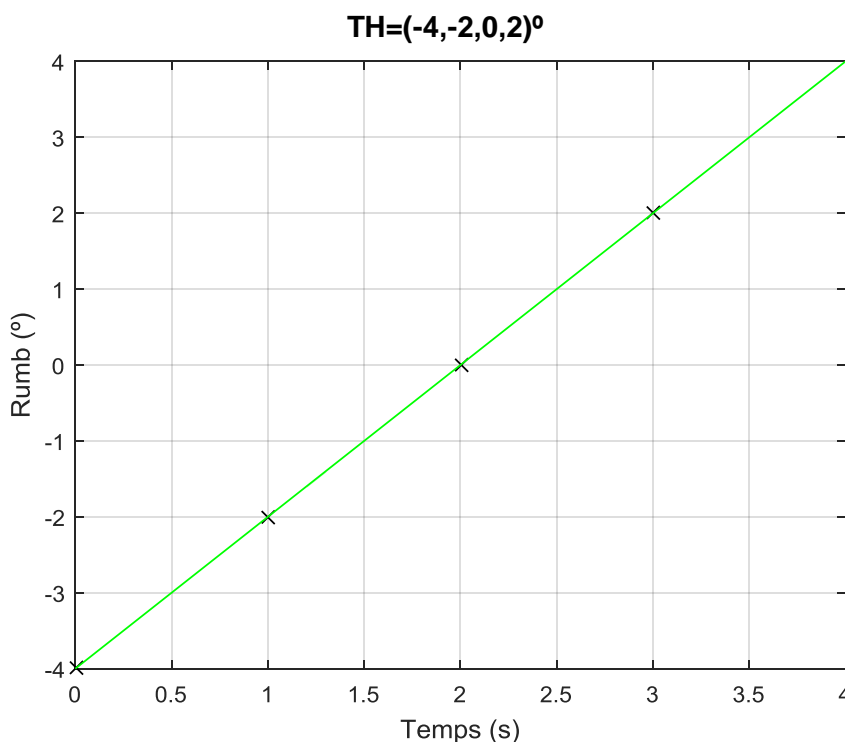


Figura 36. Representació de l'equació de la recta ajustada (Eq.20) pel mètode de regressió lineal per les dades d'exemple anteriors.

En cas que les dades de rumb siguin del tipus: $\mathbf{TH}=(6,2,358,354)^{\circ}$

$$\mathbf{DIF}=(-4,356,-4)^{\circ}$$

El valor del segon terme és més gran que 180° i el seu signe positiu, per tant la resta de 360° és de la posició 3 cap endavant:

$$\mathbf{TH}=(6,2,-2,-6)^{\circ}$$

El fet de comparar la diferència a 180° és perquè es considera que físicament el tractor mai podrà girar aquest angle en l'instant de temps entre dues mesures del GPS, per tant l'única manera que això passi és quan es doni aquesta situació.

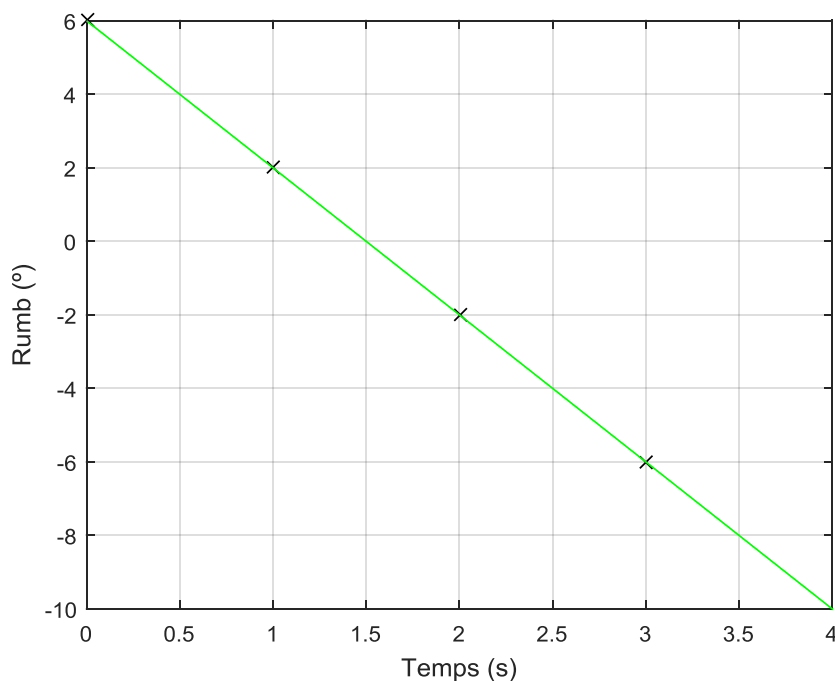


Figura 37. Representació de la regressió lineal per les dades anteriors

Es pot observar, doncs, que el funcionament de la rutina és correcte, ara cal veure la seva utilitat en aquest projecte:

- Aplicació en el projecte:

Els sistemes GPS proporcionen la informació de l'orientació de l'objecte respecte el Nord geogràfic o magnètic (és possible elegir) a partir de la direcció de la recta que uneix dues mesures consecutives de la posició de l'objecte i un calibratge previ. Així doncs, partint d'aquestes dades i de la velocitat d'avançament obtinguda pel GPS de la mateixa forma, es pot determinar el radi de la trajectòria simplement amb: $R = v/\omega$. On ω és la velocitat angular del tractor obtinguda a partir de l'equació 24 i v és la velocitat d'avançament obtinguda del GPS.

Per comprovar el funcionament del mètode s'ha suposat una circumferència de 100 metres de radi i s'ha suposat un punt de partida amb rumb 0° . A partir d'aquest, s'ha considerat una velocitat lineal del centre de la barra sobre la circumferència de 3,5 m/s (12,6 km/h), que suposen una velocitat angular de 2 °/s sobre aquesta. Considerant una freqüència de mesures del GPS de 2 Hz o 2 mesures per segon, s'han trobat la

resta de mesures amb interval d'increment de temps de 0,5 segons. Així doncs, s'han simulat unes dades d'entrada reals per quan el tractor estigués recorrent una trajectòria de radi 100 metres.

També cal tenir en compte l'error de mesura associat al GPS, que en aquest cas s'ha quantificat amb aproximadament $0,5^\circ$ per cada mesura de rumb. Per això s'ha generat una diferència aleatòria de $\pm 0,5^\circ$ per cada una i s'han realitzat 100 iteracions per observar el comportament del mètode per 5 mesures d'orientació i per 10.

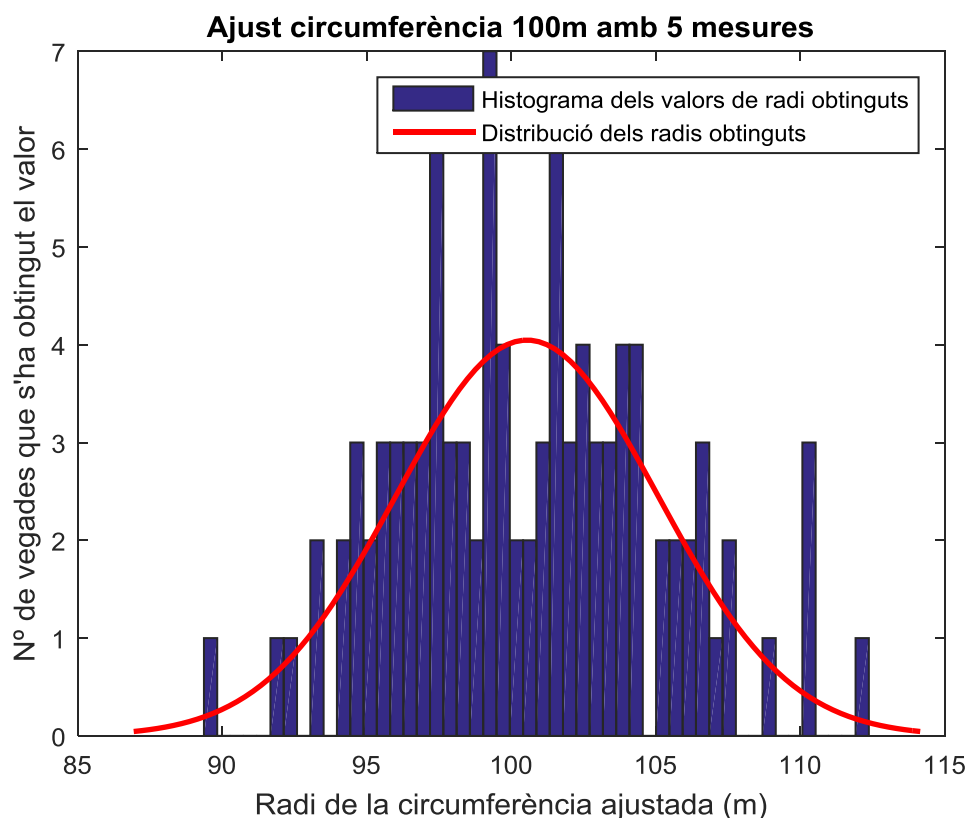


Figura 38. Representació gràfica de la distribució normal sobre l'histograma dels valors de radi obtinguts en les 100 simulacions amb 5 mesures.

Els paràmetres de la distribució normal de radis són:

$$\text{Mitjana: } \mu = 100,6907 \text{ m}$$

$$\text{Variança: } \sigma^2 = 23,8416 \text{ m}^2$$

$$\text{Desviació típica: } \sigma = 4,8828 \text{ m}$$

Com es pot veure, la mitjana de les dades és un valor força correcte, ja que la circumferència real fa 100 metres, de manera que la diferència és solament d'uns 70

cm, quasi inapreciable a efectes pràctics per un treball de polvorització. En canvi la desviació típica és de quasi 5 metres, una distància que ja podria començar a suposar errors d'aplicació. Per tant seria convenient reduir-la, per exemple, amb un GPS que permetés realitzar més mesures en el mateix període de temps. Així doncs a continuació es mostren els resultats obtinguts per la simulació amb 10 mesures en comptes de 5 en el mateix interval de temps:

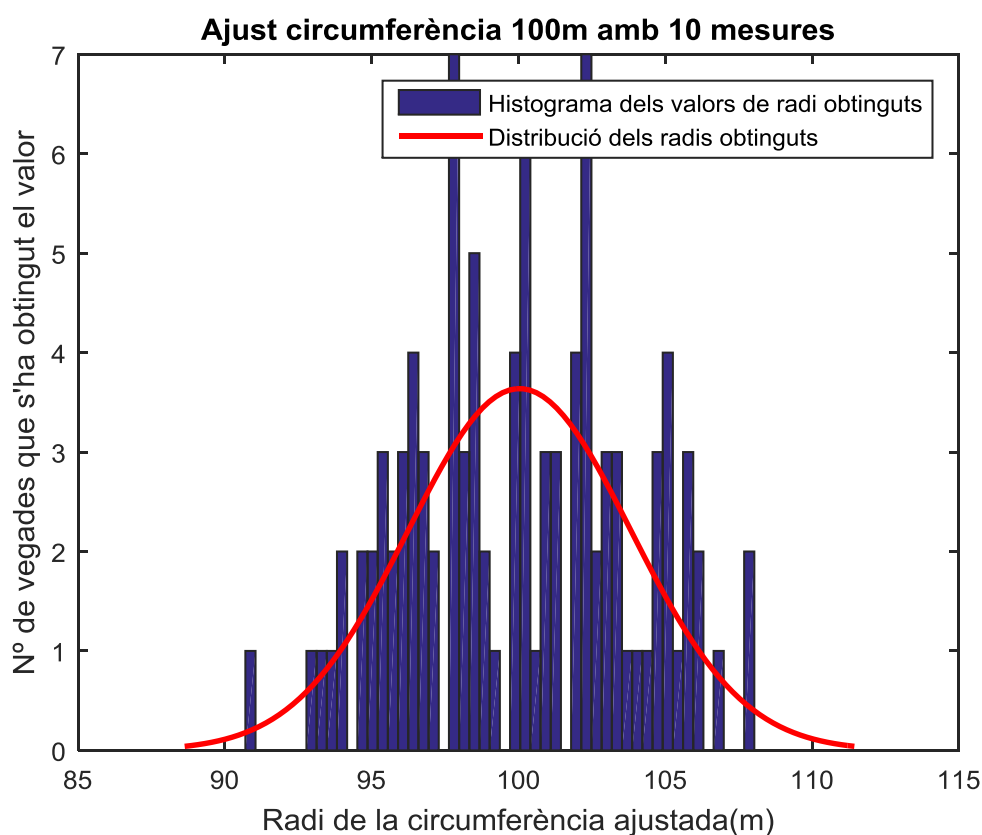


Figura 39. Representació gràfica de la distribució normal sobre l'histograma dels valors de radi obtinguts en les 100 simulacions amb 10 mesures.

Els paràmetres de la distribució normal són:

$$\text{Mitjana: } \mu = 100,0331 \text{ m}$$

$$\text{Variança: } \sigma^2 = 8,6420 \text{ m}^2$$

$$\text{Desviació típica: } \sigma = 2,9397 \text{ m}$$

En aquest cas la precisió del mètode ha millorat significativament. La desviació típica és d'uns 3 metres en lloc de 5, de manera que es pot observar com disminueix la desviació típica a mesura augmenta el nombre de mesures.

Resulta interessant veure com afecta a la desviació típica, la qual es considera el paràmetre de referència per valorar la precisió del mètode, la variació del radi real de la circumferència que s'ajusta. En la següent taula es resumeixen els resultats de varies simulacions amb diferents radis i nombre de mesures:

Taula 7. Resultats de les desviacions típiques per diferents radis de circumferència i nombre de mesures.

Radi de la circumferència (m)	σ (5 mesures, m)	σ (10 mesures, m)
20	0,24	0,13
50	1,17	0,77
100	4,88	2,94
200	17,76	13,68
300	39,42	30,76

Com es pot veure, la desviació típica disminueix a mesura que s'augmenten el nombre de mesures i es disminueix el radi de la circumferència. Això últim es degut a què, per radis més baixos, la diferència entre les mesures és més gran per un mateix interval de temps, de manera que l'efecte de l'error aplicat és menor. Es tracta d'un fet molt interessant perquè en radis més petits, on l'efecte de la desviació seria més important, aquest es redueix, mantenint una certa proporció entre el radi mesurat i l'error associat a la mesura.

Les desviacions típiques més altes es troben en valor de radi grans, els quals quasi bé no requeririen regulació ja que el tractor no gira gaire. Per tant el problema no és massa greu ja que es podria programar el sistema per què aquest no realitzi la regulació si la circumferència traçada no és inferior per exemple a 200 metres.

La conclusió doncs és que per mesurar el radi de la traçada de la barra, el mètode adequat seria el de **regressió lineal de valors d'orientació respecte el Nord**. Ja que les dades necessàries del GPS són fàcils d'obtenir, té una precisió molt correcta de la mesura i a més a més proporciona el sentit de gir de l'objecte, segons si el pendent de

la recta de regressió és positiu o negatiu, la qual cosa resulta una dada molt important pel càlcul de la distribució de velocitats com veurem a continuació.

3.4.1.2. Càlcul de la distribució de velocitats de la barra

Per determinar la velocitat en cada broquet cal dur a terme un petit anàlisi cinemàtic:

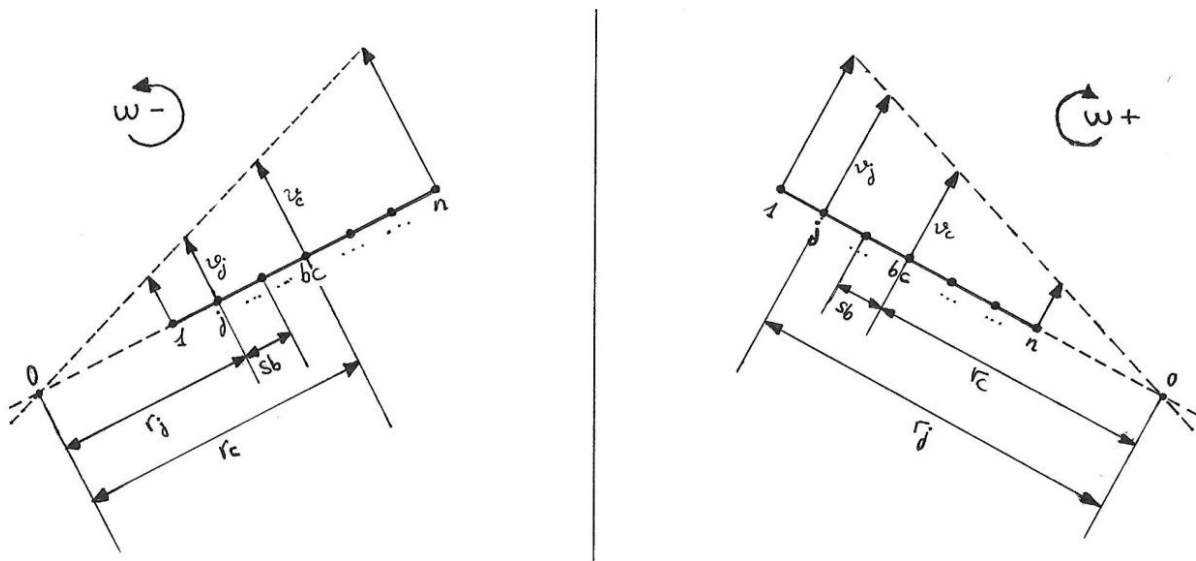


Figura 40. Anàlisi cinemàtic de l'efecte del sentit de gir en radi i la velocitat de la trajectòria de cada broquet.

Com es pot observar, el sentit de gir de la barra determina cap a quin costat es troben les velocitats superiors a v_c i cap a quin les inferiors, o dit d'una altra manera: determina si el radi de gir de cada broquet (r_j) és superior o inferior al radi al broquet central (r_c). El criteri de signes adoptat per la velocitat angular és el que es veu en la figura 39, és a dir, positiva en sentit horari i negativa en antihorari. El motiu d'això és simplement que d'aquesta manera el signe coincideix amb el del pendent de la recta de regressió. Així doncs:

$$r_j = r_c + \frac{\omega}{|\omega|} \cdot (bc - j) \cdot sb \quad (25)$$

On:

r_j : És el radi de gir de cada broquet (m).

r_c : És el radi de gir del broquet central (m).

ω : És la velocitat angular (rad/s).

bc : És la posició del broquet central.

j : Indica la posició de cada broquet en la barra.

sb : És la separació entre dos broquets consecutius (m).

Un cop es coneix el valor del radi de gir de cada broquet la velocitat d'aquests és simplement:

$$v_j = |\omega| \cdot r_j \quad (26)$$

Finalment es calcula el cabal de cada un dels broquets amb:

$$Q_j = \frac{d \cdot Ab \cdot 60}{10^4} \cdot v_j \quad (27)$$

On:

Q_j : És el cabal que surt per cada broquet en l/min.

d : És la dosi o quantitat de producte per superfície treballada que es vol aplicar en l/ha.

Ab : És l'amplada de l'aspersió del broquet (m).

v_j : És la velocitat de cada broquet (m/s).

Considerant que l'amplada d'aspersió de tots els broquets sigui la mateixa, el terme de l'esquerra de la velocitat en l'equació 27 és constant, de manera que el cabal de cada broquet és linealment proporcional a la seva velocitat.

3.4.2. Càlcul del cicle de treball de cada solenoide

Primerament cal determinar el valor del cabal que proporcionarà el broquet a la pressió de treball establerta i amb la vàlvula solenoide oberta, de manera que s'ha de realitzar un ajust de les dades obtingudes del catàleg de broquets. Normalment aquests donen unes 5 o 6 dades del valor de cabal que proporciona el broquet a les corresponents pressions de treball. Si volem disposar de la corba característica dels broquets és necessari fer un ajust a partir de les dades que apareixen en el catàleg.

Es realitza l'ajust d'un polinomi de segon grau del tipus:

$$Q_f(P) = a \cdot P^2 + b \cdot P + c \quad (Eq. 28)$$

On a, b i c són els coeficients que defineixen la corba.

Per calcular aquests coeficients s'utilitza un mètode de minimització d'error quadràtic:

$$F = \sum_i (Q_f(P_i) - Q_{fi})^2 = \sum_i (a \cdot P_i^2 + b \cdot P_i + c - Q_{fi})^2 = F(a, b, c) \quad (Eq. 29)$$

On:

P_i : És el valor de pressió de les dades del catàleg.

Q_{fi} : És el valor de cabal de les dades del catàleg.

L'objectiu és trobar uns valors de dels coeficients a, b i c que facin mínima la funció $F(a, b, c)$.

Primer es realitzen les derivades parcials de la funció respecte cada una de les seves variables i s'igualen a 0.

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \sum_i \frac{\partial}{\partial a} (a \cdot P_i^2 + b \cdot P_i + c - Q_{fi})^2 = \sum_i 2 \cdot (a \cdot P_i^2 + b \cdot P_i + c - Q_{fi}) \cdot P_i^2 = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = \sum_i \frac{\partial}{\partial b} (a \cdot P_i^2 + b \cdot P_i + c - Q_{fi})^2 = \sum_i 2 \cdot (a \cdot P_i^2 + b \cdot P_i + c - Q_{fi}) \cdot P_i = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = \sum_i \frac{\partial}{\partial c} (a \cdot P_i^2 + b \cdot P_i + c - Q_{fi})^2 = \sum_i 2 \cdot (a \cdot P_i^2 + b \cdot P_i + c - Q_{fi}) = 0 \quad (Eq. 30)$$

El següent pas és resoldre el sistema d'equacions 30 per mitjà d'un mètode numèric, en aquesta ocasió s'ha escollit el mètode de *Newton-Raphson* per obtenir la solució aproximada del sistema. El codi de la rutina iterativa del mètode es troba en l'Annex 7.1.6.

El broquet seleccionat per l'ajust es tracta d'un tipus 15, una mida força típica per polvorització amb sistema PWM que proporciona els següents cabals:

Taula 8. Dades del broquet tipus 15 segons el catàleg de Wilger del 2017

Pressió (psi)	Cabal (US GPM)	Pressió (bar)	Cabal (lpm)
20	1,06	1,38	4,01
25	1,19	1,72	4,50
30	1,30	2,07	4,92
40	1,50	2,76	5,68
50	1,68	3,45	6,36
60	1,84	4,14	6,96

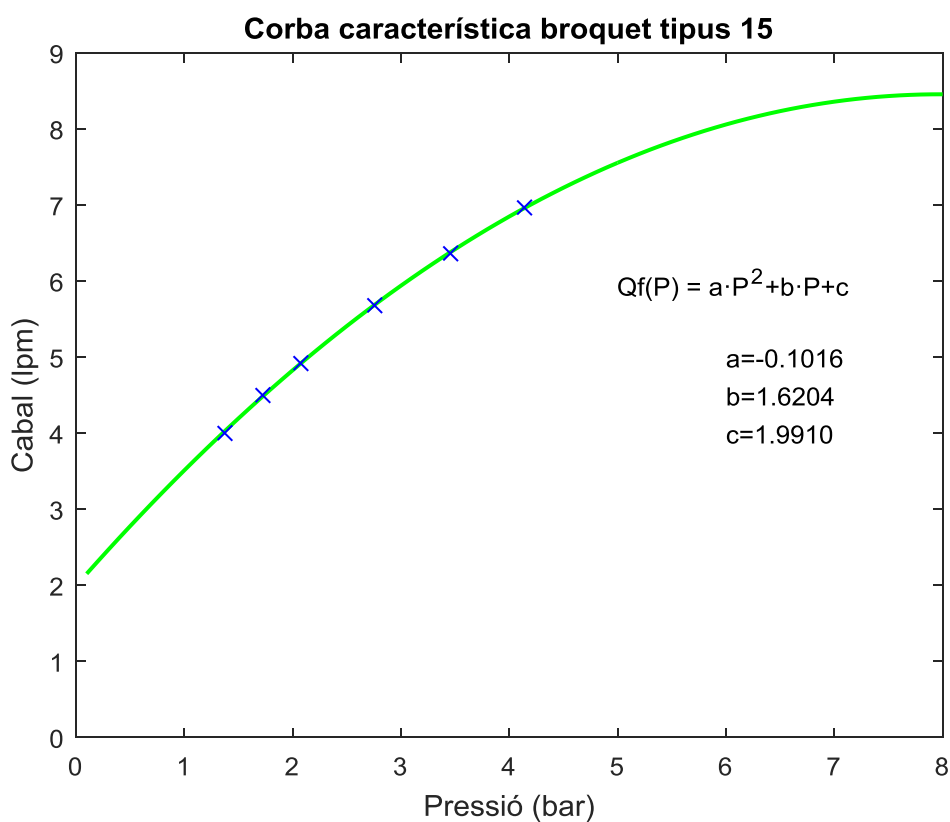


Figura 41. Representació de la corba característica d'un broquet tipus 15, ajustada a partir de les dades de la taula 8. Donat que no es disposa de valors experimentals que no estiguin entre 1 i 5 bar, fora d'aquests valors no es pot garantir que la corba sigui correcta.

Un cop trobats els valors dels coeficients, s'obté el valor de Q_f substituint la pressió de treball en l'equació 28.

En l'apartat 2.3.6. es troba l'explicació del concepte de cicle de treball o '*Duty Cycle*'.

Teòricament la relació entre el cicle de treball i el cabal subministrat pel broquet hauria de ser lineal, no obstant a la vida real per cicles de treball alts (>80 %), el cabal subministrat és quasi bé el màxim en tot el interval. Això es degut a que existeix un temps de resposta de la vàlvula, de l'ordre de 12 mil·lisegons, que sumat al temps que triga el broquet a assolir la pressió de treball (uns 8 mil·lisegons), produeix un desfasament entre el senyal elèctric i l'actuació del broquet. Això fa que el cicle de ruixat d'aquest es solapi amb el següent cicle de senyal elèctric, de manera que tot i què aquest últim no sigui del 100%, el broquet no deixi de polvoritzar en cap moment com es pot veure en la següent figura:

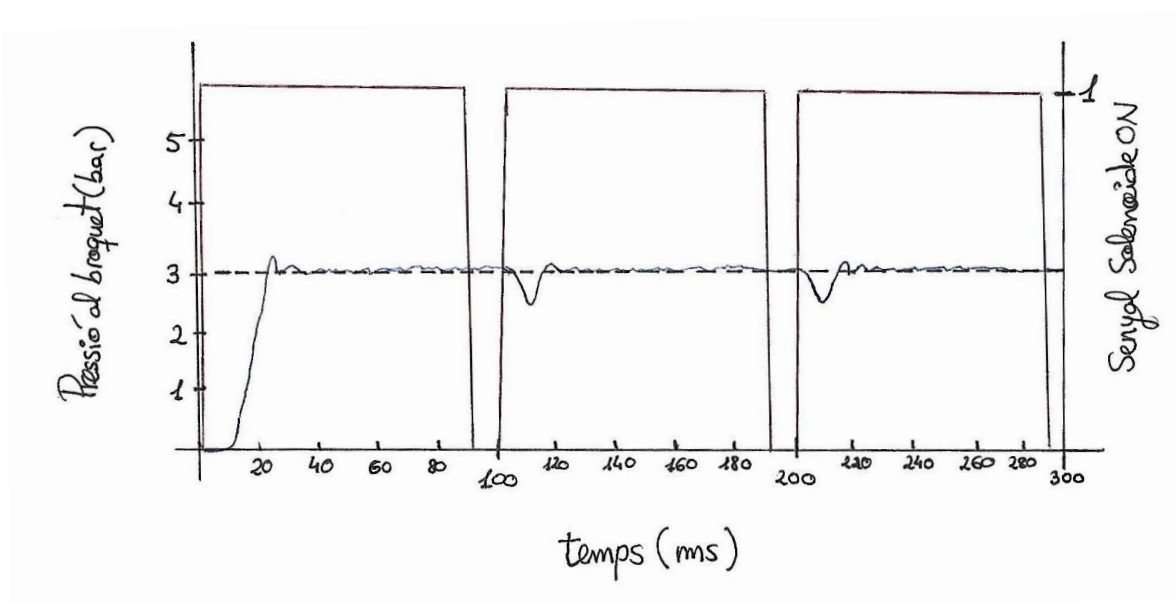


Figura 42. Representació gràfica del efecte del desfasament entre el senyal elèctric d'un cicle de treball del 90% i l'actuació del broquet. *Font: Pròpia.*

No obstant, l'afectació d'aquest fenomen és molt difícil de quantificar i s'hauria de realitzar un estudi experimental. Per aquest treball, s'assumeix que la corba Cabal (Q)-Cicle de treball (DC) és recta, ja que l'error que es produeix amb aquesta aproximació és petit.

Per cicles de treball baixos aquest desfasament també resulta problemàtic, ja que com és evident, si el temps que el senyal es troba en estat 'ON' és inferior al temps necessari perquè el broquet arribi a la pressió de treball, aquest no realitza una polvorització correcta. Per aquest motiu, el cicle de treball mínim per dur a terme una regulació correcta s'estableix en un 30%, per garantir el transcurs dels aproximadament 20ms que triga el broquet a arribar a la pressió adequada.

Així doncs, existeix una relació lineal entre aquestes dues variables com es mostra en el següent gràfic:

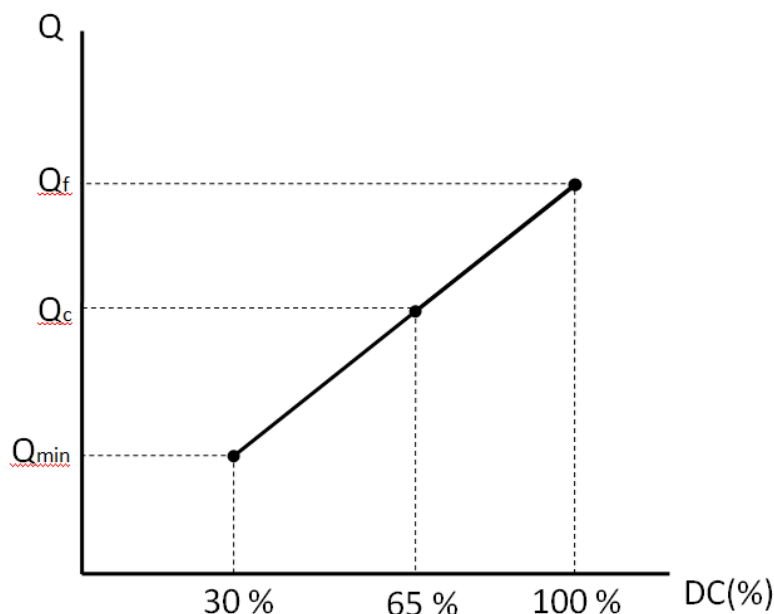


Figura 43. Gràfic que mostra la relació lineal entre el cycle de treball (DC) i el cabal que subministra el broquet. Els termes Q_f , Q_c i Q_{min} fan referència al cabal màxim del broquet, al cabal subministrat al cycle de treball de consigna i el cabal mínim que pot regular el solenoide respectivament. *Font: Pròpia.*

El valor dels termes de cabal indicats depèn del tipus i mida del broquet escollit i de la pressió a la que es vol treballar. Així doncs, un cop seleccionat el broquet cal veure en la seva corba característica quin és el cabal que subministra a la pressió de treball. Aquest valor és el valor de cabal màxim que subministrarà el sistema per cada broquet treballant al 100% del cycle de treball, és a dir, el terme Q_f . El cabal mínim Q_{min} s'obté seguint la relació lineal entre cycle de treball i cabal, de manera que: $Q_{min} = 0,3 \cdot Q_f$.

Com s'ha comentat anteriorment, la relació entre el cabal del broquet i el cycle de treball del solenoide s'admet lineal (veure figura 42), per tant es pot expressar aquesta relació com:

$$Q_j = \xi \cdot DC_j \quad (Eq. 31)$$

On DC_j és el cycle de treball de cada vàlvula solenoide i ξ és la constant o el pendent de la recta que relaciona les dues variables, el seu valor es pot trobar amb:

$$\xi = \frac{Q_f}{100} \quad (Eq. 32)$$

Així doncs ja és possible determinar el cicle de treball de cada vàlvula segons el cabal que hagi de sortir pel broquet.

$$DC_j = \frac{Q_j}{\xi} \quad (Eq. 33)$$

En cas que l'usuari establis un cicle de treball com a consigna, el sistema hauria de seguir aquest procés a la inversa, és a dir, partiria d'aquest valor de cicle de treball (DC_c) i de la pressió de funcionament del sistema (P_f), amb aquesta es determina el cabal màxim del broquet Q_f llavors amb el cicle de treball indicat es determina el cabal del broquet central Q_c . Aplicant l'equació 27 s'obté la velocitat a la que s'ha de desplaçar el broquet del centre de la barra, la qual es mostra al conductor del tractor per pantalla, indicant que aquesta és la velocitat a la que ha de treballar si vol que el cicle de treball mitjà de les vàlvules sigui el que ell vol.

3.4.3. Regulació de la pressió general del sistema

Un cop el brou és impulsat per la bomba, cal reduir-li la pressió i el cabal perquè el sistema treballi dins els marges que li corresponen. Per això es disposa d'una vàlvula reguladora de pressió proporcional de 3 vies (com es veu en les figures 20 i 21): una per l'entrada, una sortida directa per on la reguladora retorna el brou segons la seva obertura i una tercera sortida que es dirigeix a la barra i sortirà pels broquets.



Figura 44. Representació del funcionament de la reguladora de pressió de 3 vies. Quan es troba oberta (a) i quan es troba tancada (b). *Font: Catàleg Teejet 51, 2011.*

L'obertura i tancament es fa aplicant corrent en un sentit o en l'altre durant un temps, la vàlvula es va obrint o tancant segons aquest sentit li indiqui. Aquesta regulació actua quan el sensor de pressió de la barra indica un valor per sota o per sobre del que s'ha establert com a consigna. Per exemple, si el pagès vol treballar a 3 bar de pressió, mentre el sensor llegeixi aquesta mesura amb cert marge, entre 2,9 i 3,1 bar, el sistema no actuarà sobre la vàlvula, quan la pressió llegida pel sensor baixi de 2,9 bar el sistema obrirà més la vàlvula cap a la sortida a la barra, reduint així la quantitat de brou que va cap al retorn. En canvi quan la pressió pugi de 3,1 bar, el sistema obrirà més la vàlvula cap al retorn, disminuint així la pressió en la barra fins tornar-la als valors desitjats. En la figura 45 es mostra un diagrama de l'algorisme que ha de realitzar aquesta regulació:

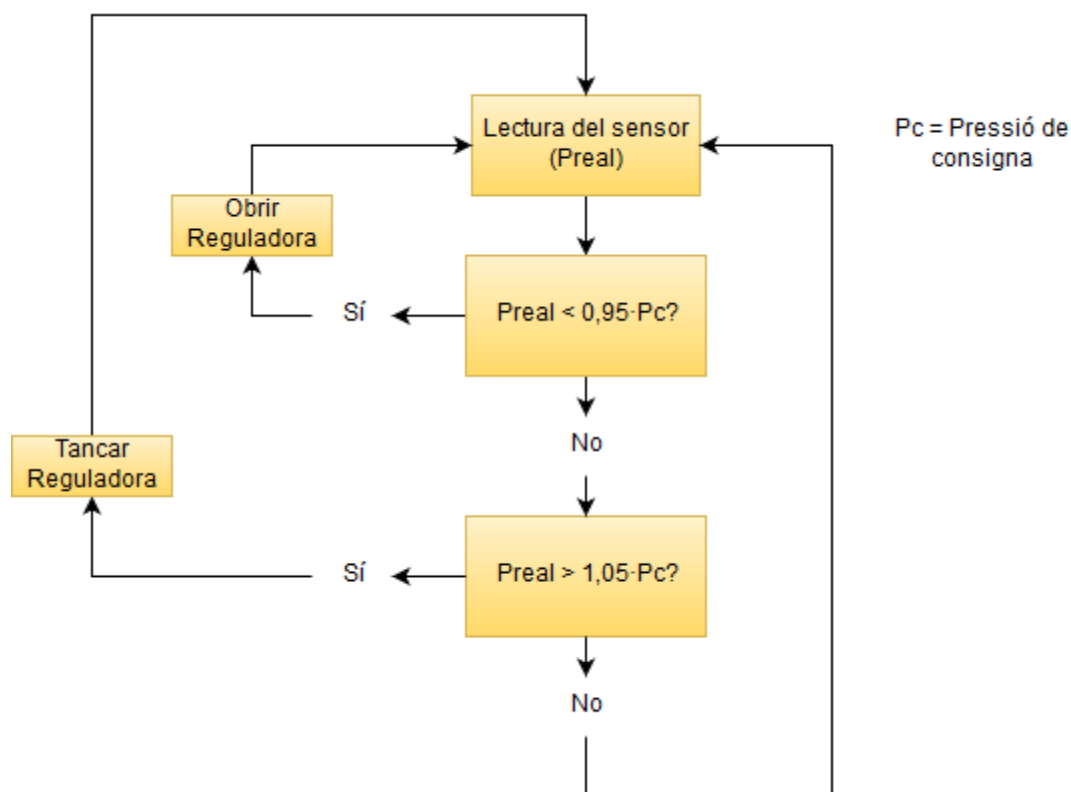


Figura 45. Diagrama del algorisme de regulació de la pressió general.

3.4.4. Pèrdues de pressió en el sistema

La part de la màquina polvoritzadora on és més important tenir en compte les pèrdues de càrrega és la canonada principal de la barra, és a dir, el tub on es connecten els broquets. El motiu és que la pèrdua de pressió al llarg de la barra suposa una reducció del cabal que subministren els broquets més allunyats del centre i això es tradueix en una aplicació per sota de la dosi indicada.

Per tal de dimensionar la canonada de la línia principal de la màquina, primerament cal seleccionar el material del qual estarà fet. Les dues opcions principals són: una canonada de plàstic o un tub d'acer inoxidable.

Es decideix utilitzar tub d'acer inoxidable degut a que permet una fixació més correcta del cos del broquet i és molt resistent a la corrosió dels productes fitosanitaris que hi circulen. El preu és més elevat, però per les longituds utilitzades en un polvoritzador de barra la diferència no suposa un cost excessiu. La rugositat del tub d'acer inoxidable és de: $\varepsilon = 0,0024 \text{ mm}$.

Pel que fa al diàmetre, aquest acostuma a ser d'una polsada (25 mm), per tant es considerarà aquest diàmetre per la primera simulació. En cas que s'hagués d'escollir un diàmetre de tub superior, caldria realitzar modificacions en les subjeccions dels cossos dels broquets al tub, ja que molts fabricants no en realitzen per tubs de més d'una polsada.

El dimensionat de la canonada es considera correcte si aquesta no suposa unes pèrdues de càrrega per fricció del centre de la barra fins l'extrem superiors al 5%.

Es consideren els punts 1 i 2 en el centre de la barra i en un extrem respectivament, de manera que:

$$P_1 - P_2 < 5 \% \text{ de } P_1$$

S'aplica l'equació de l'energia entre els punts 1 i 2:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

$$\boxed{h_{1-2} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}} \quad (Eq. 34)$$

El cabal que circula per la meitat de la barra es calcula amb l'equació 27.

$$Q = \frac{d \cdot v \cdot \frac{L}{2} \cdot 60}{10^4}$$

Per calcular el nombre de Reynolds:

$$v_f = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (Eq. 35)$$

$$Re = \frac{v_f \cdot D}{\nu} \quad (Eq. 36)$$

On:

Re : és el nombre de Reynolds

v_f : és la velocitat a la que es desplaça el fluid per la canonada en m/s

ν : és la viscositat cinemàtica del aigua en m^2/s

Es calculen les pèrdues de càrrega entre els punts 1 i 2 a partir de l'equació de Darcy-Weisbach:

$$f = \frac{1,325}{Ln^2 \left(\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)} \quad (Eq. 37)$$

$$h_{1-2} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v_f^2}{2g} \quad (Eq. 38)$$

Finalment es desenvolupa l'equació 34:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (Eq. 39)$$

$$P_1 - P_2 = h_{1-2} \cdot \gamma$$

A continuació es simula una situació de treball força desfavorable, amb una dosi i una velocitat força elevades per aquests treballs, es prova el comportament amb tub d'1" (25mm) i d'1 1/4" (32 mm).

Taula 9. Paràmetres per simular unes condicions de treball desfavorables pel polvoritzador en quant a pèrdues de càrrega.

Longitud de la barra (m)	30
Dosi aplicada (l/ha)	250
Velocitat d'avançament (km/h)	15
Rugositat del tub (mm)	0,0024
Viscositat cinemàtica de l'aigua* (m ² /s)	1,006·10 ⁻⁶
Densitat de l'aigua* (kg/m ³)	1.000
Diàmetre del tub (mm)	25 (1") i 32 (1 ¼")

*Les propietats fluidomecàniques del brou es consideren les de l'aigua, ja que aquest és aigua en un percentatge molt alt.

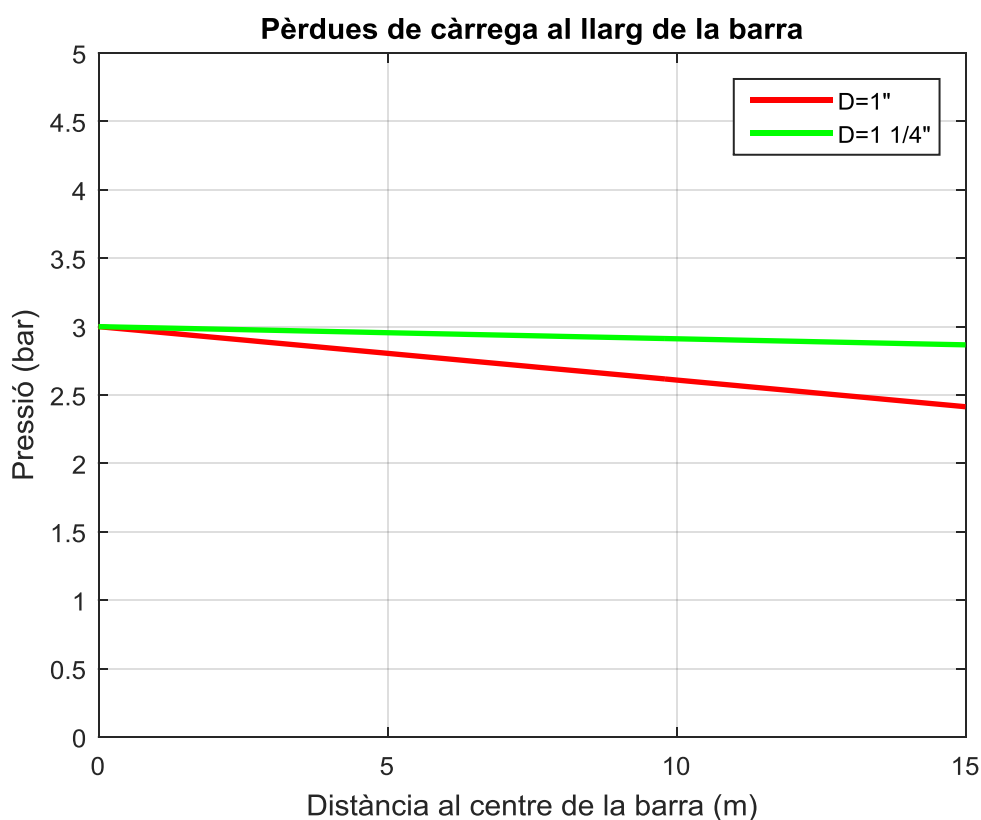


Figura 46. Gràfic de la pressió en un tub d'acer inoxidable de 15 metres (mitja barra) de longitud per uns diàmetres interiors d'1" (25mm) i 1 ¼" (32mm). En tots dos casos el cabal que hi circula és de 96 L/min.

Com es pot observar, les pèrdues de càrrega pel tub d'1" (25mm) són massa grans, ja que del centre a la punta es perden per fricció 0,59 bar, que suposa una caiguda de pressió del 19,52%, quan el màxim assumible es troba sobre el 5%. El cabal que circula per tub en tots dos casos es el mateix, degut que no ha variat la amplada de la barra ni cap de les dades de consigna de la simulació. El que si que es pot veure és que pel tub d'1 ¼" (32 mm) les pèrdues produïdes són de 0,13 bar o un 4,44% respecte la pressió del centre, de manera que es troba dins els marge permès. Per tant es pot establir com a paràmetres de disseny màxims que **la barra polvoritzadora té una longitud de 30 metres i un diàmetre interior d 1 ¼" o 32 mm.**

3.4.5. Esquema general del software de regulació

En la següent pàgina es mostra un diagrama de l'estructuració del procés de càlcul explicat en els apartats anteriors per dur a terme la regulació.

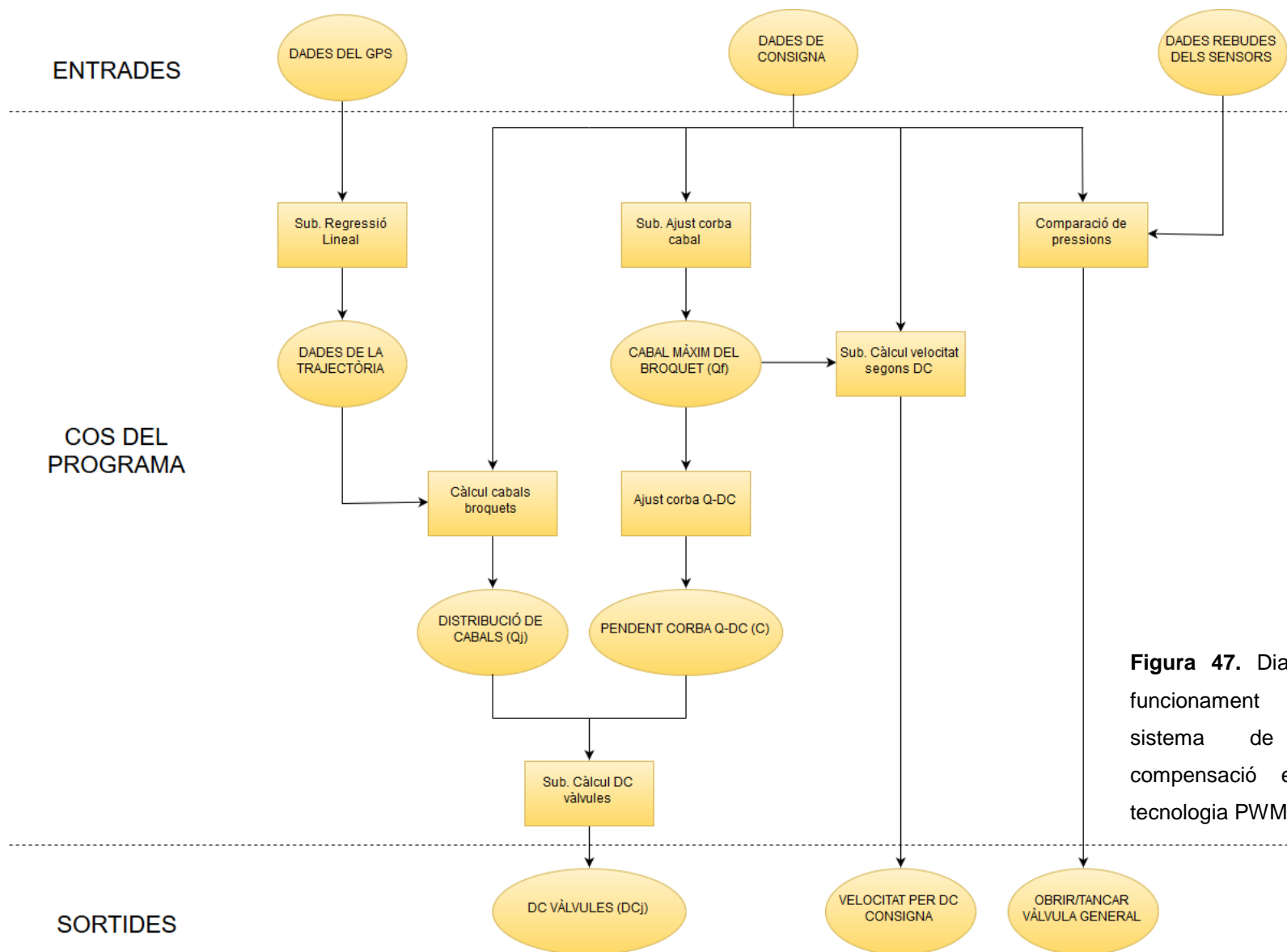


Figura 47. Diagrama general del funcionament del software del sistema de regulació per compensació en els girs amb tecnologia PWM.

El software parteix d'unes dades d'entrada, que són:

- **Dades de consigna:** Són les dades introduïdes per l'usuari a través de la pantalla. Algunes són constructives i només s'han d'introduir una vegada o quan es modifica físicament la barra, aquestes són: número de broquets, separació entre aquests, color del broquet (mida), angle d'aspersió i amplada de treball efectiva de la barra. Les altres són específiques pel treball que es vol realitzar: pressió de treball, dosi d'aplicació, cicle de treball mitjà i cicle de treball mínim.
- **Dades del GPS:** Són les dades captades pel receptor GPS situat en el centre de la barra polvoritzadora. Indiquen la posició del centre de la barra, l'altura, la seva velocitat, el seu rumb respecte el Nord (*'heading'*) i el temps fins cada mesura. Es considera correcta una freqüència del GPS de 5Hz, és a dir, que faciliti unes 5 dades per segon amb les que poder realitzar el càlcul de la trajectòria.
- **Dades dels sensors:** En aquest sistema es contempla l'existència de dos sensors situats entre la sortida de la reguladora de pressió i la barra: un sensor de pressió, situat en la línia de treball principal, i un cabalímetre, que mesura la quantitat de producte que surt de la reguladora en direcció a la barra, tal i com es pot veure en les figures 20 i 21.

Totes aquestes dades entren dintre del cos de programació del sistema de regulació i permeten obtenir les següents sortides:

- **Cicle de treball de les vàlvules (DC_i):** És el cicle de treball del senyal elèctric que és enviat a les vàlvules a través d'un mòdul de sortides PWM connectat al microcontrolador (passant per un transistor que l'amplifiqui).
- **Velocitat pel cicle de treball de consigna:** És el valor de la velocitat a la què s'hauria de desplaçar el tractor per tal què el cicle de treball mitjà, que és el cicle de treball en el broquet del centre, sigui l'indicat en les dades de consigna. Aquesta velocitat es mostra al conductor per pantalla solament a mode indicatiu.

- **Obertura o tancament de la vàlvula general:** Aquesta dada s'obté d'una comparació entre la pressió que llegeix el sensor i la pressió de treball indicada en les dades de consigna. Enviant el senyal d'obertura o tancament de la vàlvula segons s'ha explicat en l'apartat 3.4.3.

El funcionament d'aquest sistema automàtic de regulació ha de permetre al pagès haver de preocupar-se només d'introduir unes dades d'entrada segons el tipus de feina que hagi de realitzar i conduir el tractor, mantenint-lo a una velocitat propera a la que se l'hi indica per pantalla.

També cal destacar que l'usuari estableix en les dades de consigna el cicle de treball mínim DC_{min} de les vàlvules solenoide, de manera que encara que fos necessari per aplicar la dosi correcta, aquestes mai treballaran amb un valor per sota del indicat, ja que els cicles de treball excessivament baixos no són adequats per realitzar una bona polvorització com s'ha explicat en l'apartat 3.4.2.

3.4.6. Simulacions del funcionament del sistema

S'han realitzat un total de 3 simulacions. La primera consisteix en mostrar com s'adapta la regulació del cicle de treball de cada vàlvula a les variacions de velocitat del centre de la barra i de la pressió de treball establerta. La segona simulació mostra el comportament del sistema en cicles de treball baixos (per sota del 30%) on la regulació ja no es considera completament correcta. Finalment la tercera simulació pretén mostrar el comportament del cicle de treball de les vàlvules dels extrems de la barra i de la situada en el centre, per una distribució sinusoïdal de velocitats angulars al llarg d'un període de temps.

La rutina MATLAB realitzada per dur a terme la simulació del funcionament del software del sistema de regulació es troba adjunta en l'Annex 7.1.2 amb el nom de: *Script General*.

En totes les simulacions els paràmetres constructius de la barra són els mateixos i es mostren en la taula 10.

Taula 10. Paràmetres constructius de la barra per la simulació

Longitud de treball de la barra (m)*	Separació entre broquets (m)	Nombre de broquets	Amplada de treball per broquet (m)
21	0,5	41	1

*Per calcular la longitud de treball efectiva de la barra, què és l'amplada d'aspersió de tots els broquets de la barra, s'ha de sumar la meitat de l'amplada de treball dels broquets de la punta per banda a la longitud física de la barra.

Simulació 1

La primera simulació es realitza amb les següents dades:

Taula 11. Paràmetres de consigna de l'usuari per la primera simulació

Dosi (l/ha)	Pressió de treball (bar)	Cicle de treball mitjà	Cicle de treball mínim
200	3	65	30

Taula 12. Dades del GPS utilitzades en la primera simulació. Les mesures de temps i de rumb s'expressen en vectors de 5 dades corresponents a les mesures d'un GPS amb 5Hz de freqüència en un interval d'1 segon.

Nº de mesura	Temps fins cada mesura	Angle de rumb mesurat (º)	Velocitat d'avançament (km/h)
1	0,2	44	12,15 i 8
2	0,4	45	
3	0,6	46	
4	0,8	48	
5	1	49	

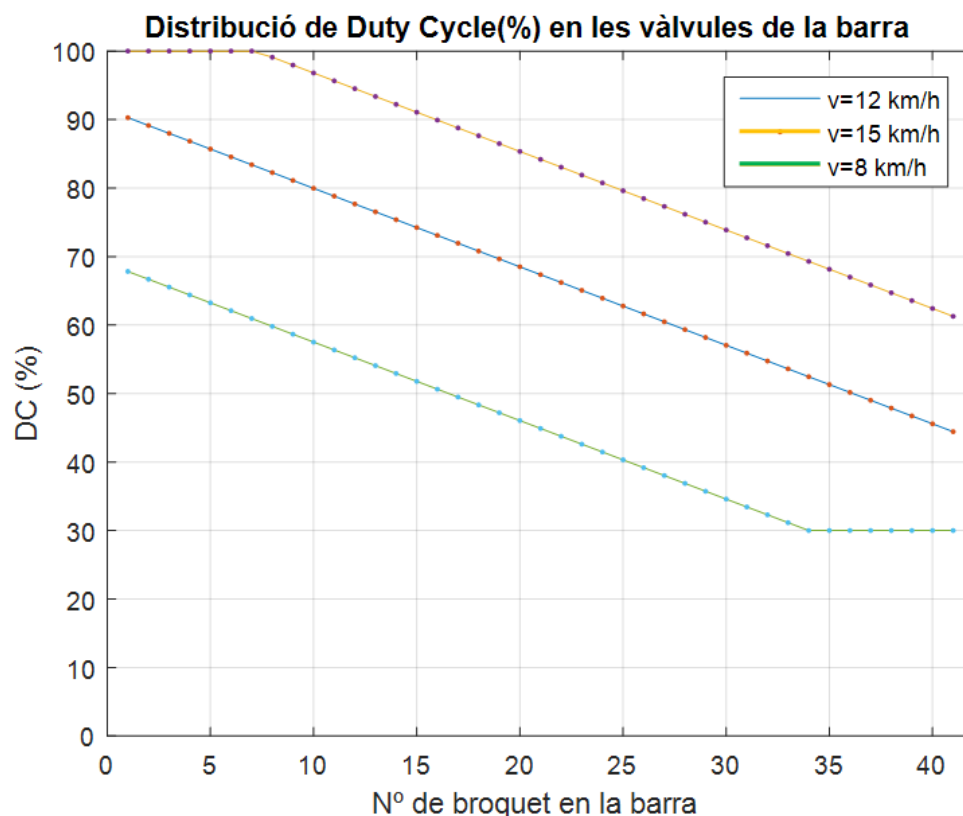


Figura 48. Distribucions dels cicles de treball en cada broquet de la barra per 3 velocitats diferents.

Com es pot observar, el sentit de gir coincideix amb el que indicaven les dades del GPS, ja que en elles l'angle d'orientació augmentava en el temps, de manera que teòricament el tractor girava en sentit horari o, vist segons el conductor, cap a la dreta. La representació quadra amb aquest sentit de gir perquè en els broquets de la dreta, que en aquest cas havien de quedar en l'interior de la corba i, per tant, desplaçar-se amb menys velocitat, els cicles de treball són més baixos, adaptant el cabal a aquestes velocitats inferiors per tal de mantenir la dosi aplicada. El contrari passa amb els broquets que queden en la part exterior de la corba, és a dir, en la part esquerra de la barra, en aquests el cicle de treball és superior ja que les seves velocitats en la corba també ho són. El programa indica que el radi de gir obtingut és d'uns 30 metres, tenint en compte que la barra en fa 20, aquest representa una corba força tancada, per això la diferència de cicle de treball entre els dos extrems és considerable, aproximadament d'un 45%.

Augmentant la velocitat el cicle de treball es desplaça cap a dalt en el gràfic, ja que necessita augmentar la quantitat de cabal que subministra cada broquet per tal de mantenir una dosi constant. El mateix passa al disminuir la velocitat, com es pot veure el sistema s'adapta a aquesta reduint el cicle de treball de les vàlvules. També és important destacar el fet que el cicle de treball en el broquets mai baixa del 30%, tal i com s'ha indicat com a dada de consigna, i lògicament mai sobrepassa el 100%. El programa també mostra per pantalla la velocitat adequada perquè el cicle de treball mitjà sigui el que vol l'usuari, en aquest cas per a què el sistema treballi amb una mitja del 65%, la velocitat seria 11,6 km/h.

Si ara en comptes de modificar la velocitat d'avançament del tractor, es modifica la pressió de consigna del sistema, mantenint les dades de velocitat i trajectòria, s'observa el següent:

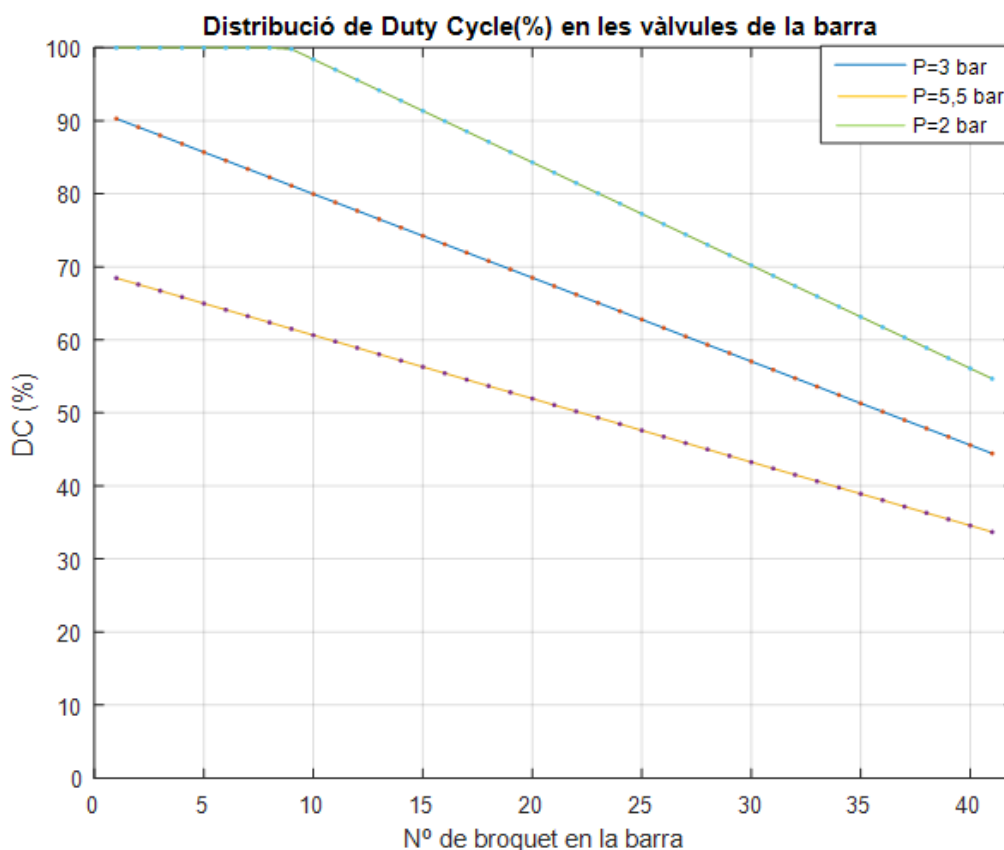


Figura 49. Distribucions dels cicles de treball en cada broquet de la barra per 3 valors diferents de pressió de consigna.

Com es pot observar, augmentant la pressió de treball dels broquets augmenta també el cabal que aquests subministren en un mateix període de temps, seguint la corba de

la figura 41. Per tant, per aplicar la mateixa quantitat de producte no es necessari que la vàlvula solenoide estigui tant temps oberta, i això es reflecteix en una disminució del cicle de treball en les vàlvules. Al disminuir la pressió, el que es produeix és un augment del cicle de treball pel mateix principi. També es pot observar que les 3 corbes no són paral·leles entre sí, això és degut a que la relació entre la pressió i el cabal del broquet no és lineal, de manera que no és manté la proporció entre augment o disminució de la pressió i la conseqüent modificació del cabal, efecte que es reflexa doncs en el cicle de treball.

Simulació 2

A continuació es simula un gir més brusc i en el sentit contrari, també es modifiquen alguns paràmetres de consigna:

Taula 13. Paràmetres de consigna de l'usuari per la segona simulació

Dosi (l/ha)	Pressió de treball (bar)	Cicle de treball mitjà	Cicle de treball mínim
200	3	60	30

Taula 14. Dades obtingudes del GPS per la segona simulació.

Nº de mesura	Temps fins cada mesura	Angle de rumb mesurat (º)	Velocitat d'avançament (km/h)
1	0,2	345	8
2	0,4	343	
3	0,6	342	
4	0,8	339	
5	1	335	

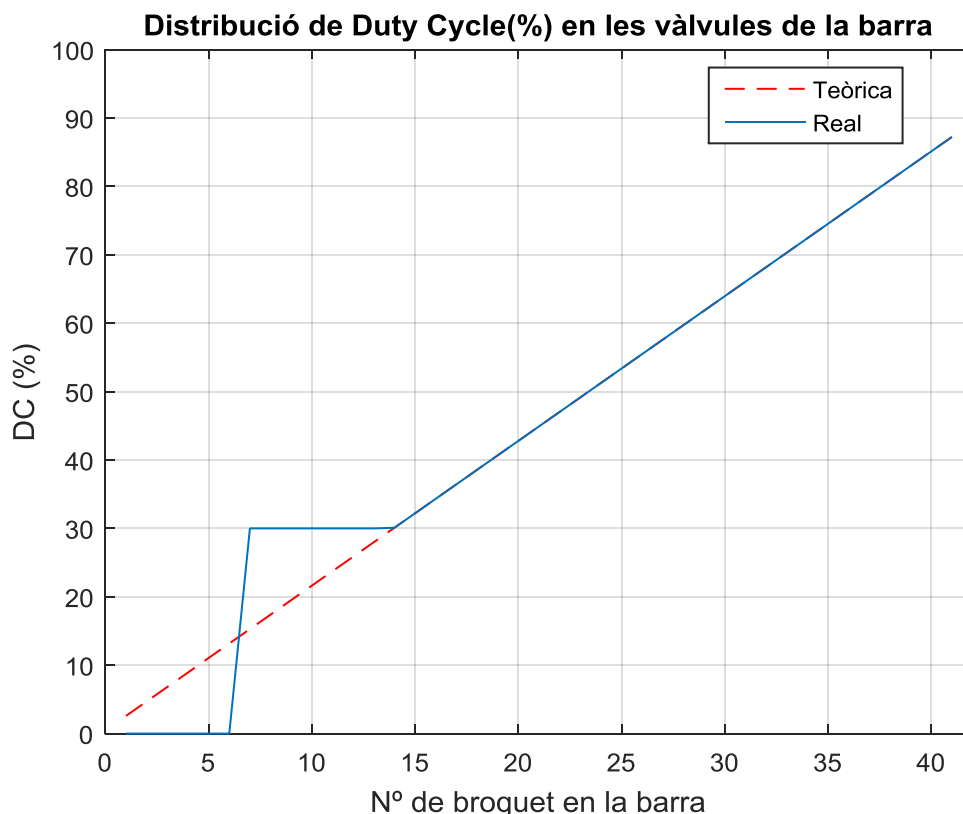


Figura 50. Representació dels cicles de treball obtinguts per cada broquet en la simulació 2.

El fet a destacar d'aquesta simulació és veure com actua el sistema en els cicles de treballs baixos. En aquest cas el cicle de treball mínim s'ha establert en el 30%, per tant quan el valor teòric baixa per sota d'aquest, el sistema el manté en el 30%, no obstant, si el valor de cicle de treball teòric es troba per sota de la meitat del mínim, en aquest cas seria per sota del 15%, el cabal ideal que hauria de subministrar és més proper a 0 que al subministrat amb el 30%, per tant la regulació és més correcta si es tanca completament la vàlvula. Evidentment per valors de DC negatius la vàlvula també ha de romandre tancada, d'aquesta manera s'evita el problema de les velocitats negatives en la barra, que suposarien un solapament de la superfície ja treballada instants abans. En aquest cas el radi de la trajectòria obtingut és d'uns 10,6 metres, una mica més de la meitat de la barra, que seria el radi crític on començarien a aparèixer velocitats negatives.

Simulació 3

En la següent simulació es pretén mostrar el comportament del cicle de treball de 3 vàlvules concretes: la situada en el broquet central (DC_C), i la dels broquets de les

puntes (nº 1 i nº j segons la figura 29), per un recorregut sinusoidal de velocitats angulars, des de 0,2 rad/s fins a -0,2 rad/s. Els paràmetres de simulació a destacar en aquest cas són:

Taula 15. Paràmetres importants per la tercera simulació.

Dosi (l/ha)	Pressió de treball (bar)	Cicle de treball mínim	Velocitat
			d'avançament GPS (km/h)
200	3	20	10

Els paràmetres constructius es mantenen igual que en les simulacions anteriors, és a dir, la barra té una amplada de 20 metres i hi ha 41 broquets.

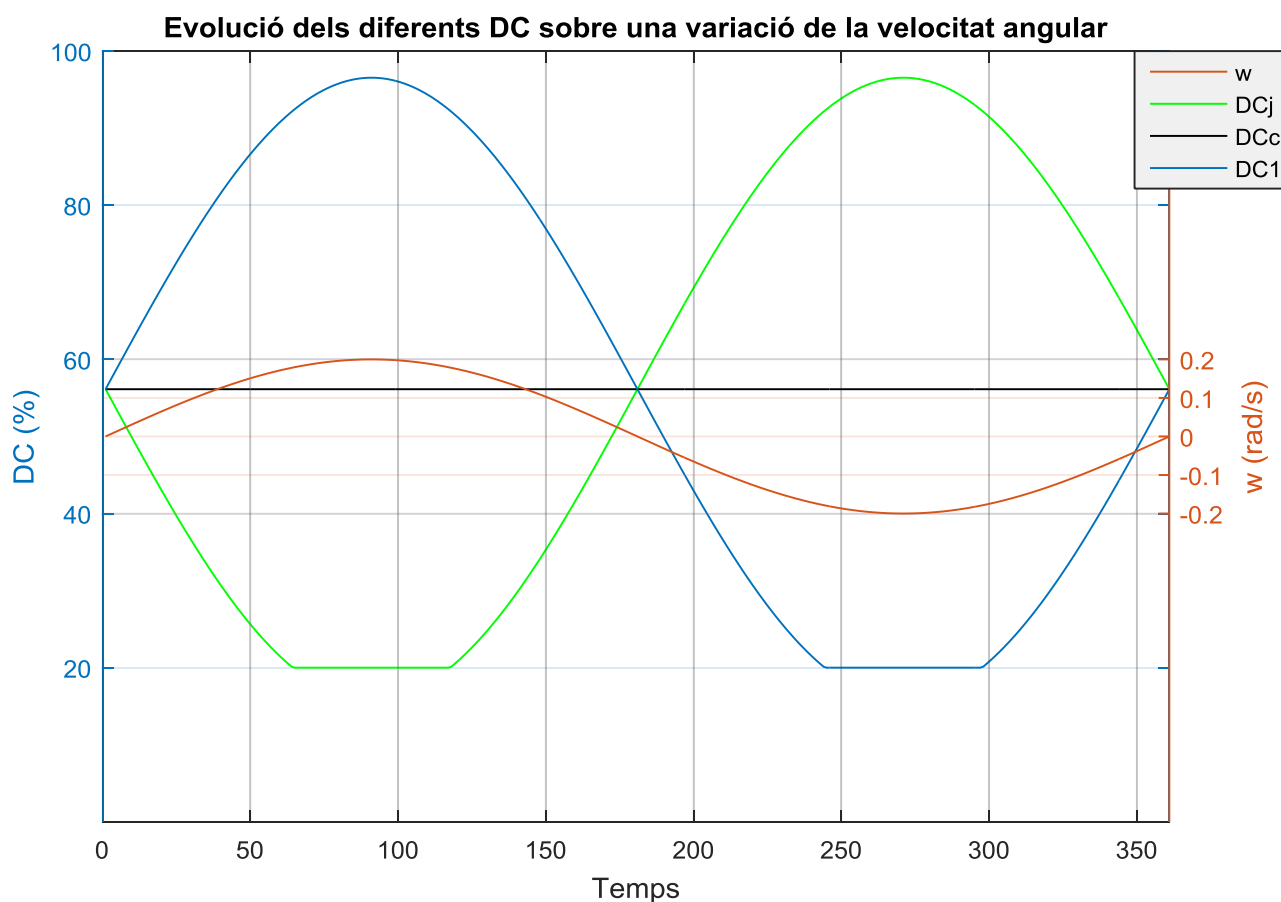


Figura 51. Representació del comportament del cicle de treball de la primera vàlvula de la barra (blau), de la central (negre) i de la última (verd), per una distribució sinusoidal de velocitats angulars (marró) al llarg d'un període de temps.

Les vàlvules dels extrems de la barra representen els valors màxim i mínim del cicle de treball en un instant de temps i a una velocitat angular de terminada. Com es pot veure, per velocitats angulars positives (gir a la dreta) el cicle de treball de la vàlvula 1, situada en l'extrem esquerra de la barra, és sempre superior a la vàlvula j, situada en l'extrem dret i que en aquest cas correspondria a la número 41. En canvi, pels valors negatius de velocitat angular és al revés. El cicle de treball en la vàlvula del centre de la barra, que és alhora el cicle de treball mitjà de la distribució de la barra, sempre es manté constant, ja que la velocitat lineal del tractor no varia per aquesta simulació. Per tant el cabal total que ha de sortir per la suma dels cabals de tots els broquets ha de ser el mateix.

3.4.7. Limitacions del sistema de regulació

S'entén per límit del sistema, aquell radi de trajectòria o aquella velocitat amb la qual el sistema comença a ser incapaç de regular completament el cabal de cada broquet per adaptar-se al seu desplaçament, o dit d'una manera més concreta, que el cicle de treball teòric d'algun broquet no es troba entre el valor mínim de consigna i el 100%.

No és possible especificar un radi mínim o una velocitat màxima o mínima en general pel sistema, ja que segons les característiques físiques de la barra i també les dades de consigna assignades, aquests límits varien. Els paràmetres que afecten aquestes limitacions del sistema són els següents:

- **Longitud de la barra:** Resulta força clar que com més llarga sigui la barra, més problemes tindrà el sistema per dur a terme correctament la regulació. Això es deu a què una major longitud de la barra implica una major diferència de velocitats entre els seus extrems, que es reflecteix directament en una major diferència entre els cicles de treball de les vàlvules dels broquets de les dues puntes. El que si que es pot dir és que traçades de radi igual o inferior a la meitat de la barra no es regularan correctament, ja que la presència de velocitats baixes, nul·les o negatives fa que les vàlvules solenoide no puguin regular de manera correcta.
- **Dosi de consigna:** La dosi de consigna té una relació directa amb el cicle de treball mitjà del sistema, de manera que si aquest s'allunya molt dels seus valors que permeten una màxima maniobrabilitat (entre 60 i 70% de DC)

resulta evident que es perd capacitat de gir, degut a l'aproximació d'un dels dos extrems de la barra a algun dels seus cicles de treball límit.

- **Pressió de treball:** Si s'augmenta la pressió de consigna, la mitjana del cicle de treball necessari en les vàlvules baixa, tal i com s'ha vist en la primera simulació del sistema. El broquet subministra més cabal i per tant necessita menys temps d'obertura en cada cicle per subministrar la mateixa quantitat que a una pressió més baixa. Lògicament disminuint la pressió succeeix el contrari, que la mitjana de cicles de treball en les vàlvules augmenta pel mateix principi. La variació del cicle de treball mitjà fora de certs valors suposa pèrdua de maniobrabilitat com s'ha comentat anteriorment.
- **Cicle de treball de consigna:** Aquest paràmetre no afecta directament a la capacitat de gir, no obstant si aquest s'estableix fora dels valors de màxima maniobrabilitat i el conductor es desplaça a la velocitat que indica el sistema, es perd maniobrabilitat pel mateix motiu que en els dos casos anteriors.

3.4.8. Estructura del sistema de regulació

Per tal que aquest sistema funcioni, cal definir quins són els elements físics (senyors, vàlvules, controladors...) necessaris per dur a terme el procés i també com aquests es connecten entre sí.

En primer lloc cal destacar els elements necessaris per obtenir les dades d'entrada:

- **Pantalla tàctil:** Es troba situada en la cabina del conductor del tractor, serveix perquè aquest introdueixi les dades constructives de la barra i els paràmetres de consigna específics per cada treball, tal i com s'ha explicat en l'apartat 3.4.4.
- **Receptor GPS:** Va connectat a una antena que rep el senyal i el transmet cap al receptor, de manera que aquest l'interpreta i envia l'estructura informativa corresponent al microcontrolador. D'aquesta manera és possible obtenir les dades de rumb, temps de les mesures, velocitat i posició de la barra.
- **Sensor de pressió:** Com indica el seu propi nom, s'encarrega de mesurar la pressió real en la barra en cada instant, enviant aquest valor al microcontrolador perquè el compari amb el valor de consigna i veure si es necessari regular la vàlvula general.

- **Cabalímetre:** Per aquest primer disseny del sistema la seva utilitat és merament informativa. Permet mesurar el cabal que es dirigeix a la barra, que ha de ser el mateix que surt pels broquets. Una possible idea per millorar el disseny del sistema seria donar al conductor la possibilitat d'elegir si la regulació de la vàlvula general es du a terme a través del sensor de pressió o del cabalímetre.

Tots aquests elements han de proporcionar la informació necessària perquè el microcontrolador pugui realitzar l'execució del programa i transmetre els valors obtinguts als actuadors, que en aquest cas són les vàlvules solenoide.

El problema és que el senyal que proporciona el microcontrolador no és suficient com per accionar una vàlvula solenoide de 12V, sent necessari amplificar el senyal a través d'un transistor NPN. De manera que els elements que proporcionen la sortida són els següents:

- **Mòduls PWM:** Es tracta d'uns mòduls de sortides PWM que permeten augmentar el nombre habitual de sortides d'aquest tipus que hi ha en una placa controladora. Es connecta al microcontrolador i les seves sortides són comandades per aquest. La seva alimentació és a 5V.
- **Reguladors de tensió:** Redueixen el voltatge que proporciona la bateria del tractor fins un valor de 5V que permeti alimentar els mòduls PWM.
- **Transistors:** Permeten augmentar el senyal que proporcionen els mòduls fins un senyal que pugui fer funcionar les vàlvules solenoide. La connexió a la bateria és la que subministra la tensió necessària per fer-ho.
- **Vàlvules solenoide:** Són l'actuador en si, l'element que transforma el senyal de pulsació elèctric en una pulsació física, per tal de poder regular el cabal. La seva alimentació sol ser a 12V.
- **Reguladora de pressió:** La seva funció és mantenir constant la pressió de treball del sistema al voltant del valor de consigna. S'acostumen a alimentar a 5V.

L'estructura dels diferents elements que formen el sistema de regulació i les seves connexions es mostra en el següent esquema:

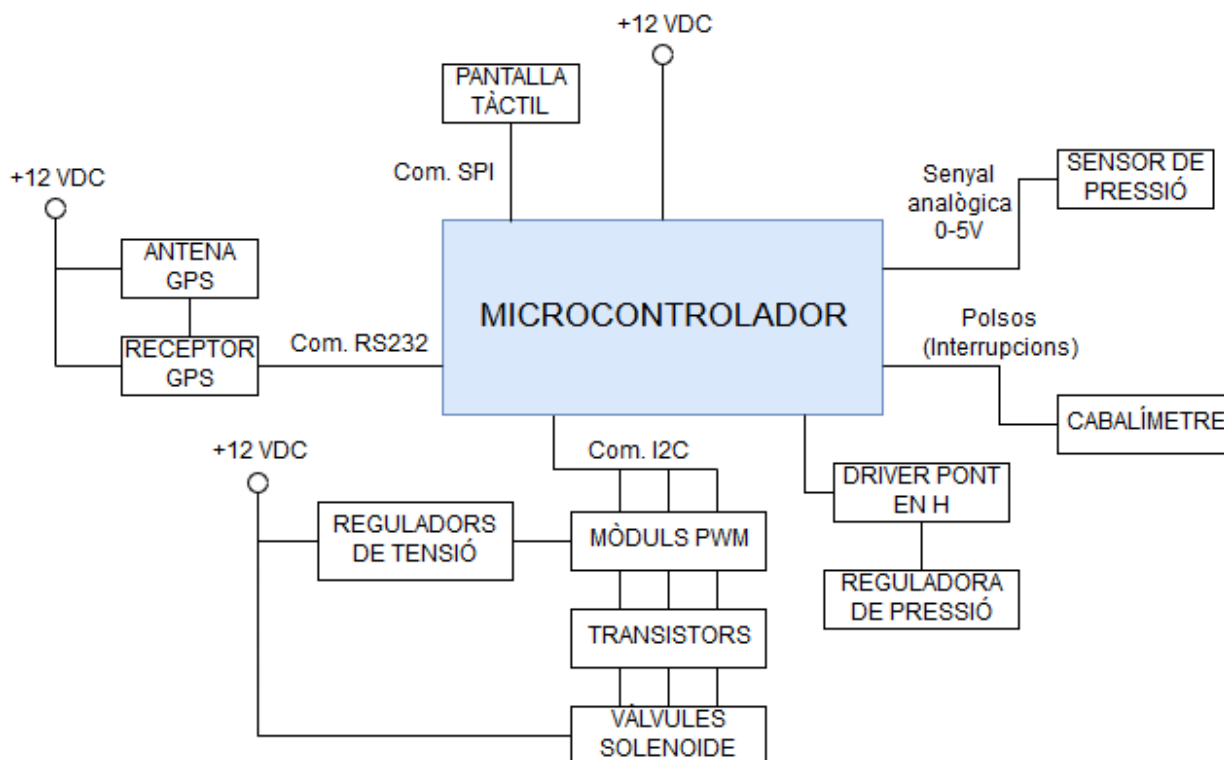


Figura 52. Esquema del muntatge del sistema de regulació amb polsos.

Els punts de +12VDC que apareixen en l'esquema fan referència a la connexió al born positiu de la bateria del tractor. Com es pot observar, es tracta d'un esquema indicatiu, els models escollits per cadascun dels elements es mostra en el següent apartat.

3.4.9. Selecció dels elements que formen el sistema

Tots els elements que apareixen a continuació han estat escollits seguint un criteri que permetés realitzar correctament l'esquema del muntatge del sistema per tal de garantir el seu funcionament, això no significa que aquestes opcions siguin les úniques vàlides.

3.4.9.1. *Microcontrolador*

És el centre de control del sistema de regulació, on es troba la programació i on es realitza la transformació de les dades d'entrada a les de sortida.

Per aquest projecte la placa controladora escollida és l'**Arduino MEGA 2560**, basada en el microcontrolador ATmega 2560.

Taula 16. Característiques de la placa controladora.

Fabricant	Arduino
Model	MEGA 2560
V_{in}	7-12 V
Pins digitals I/O	54 (15 PWM)
Corrent DC pins I/O	40 mA
Voltatge d'operació	5 V
Alçada	53,3 mm
Amplada	101,5 mm
Pes	36 g



Figura 53. Placa controladora Arduino MEGA 2560. Font: <http://www.arduino.org>

La placa disposa de 3 possible entrades d'alimentació, una amb connexió USB directa de 5V, una altra amb connexió 'jack' amb entrada fins a 12V i l'altra directament al pin V_{in} també fins a 12V. Té 54 pins d'entrades i sortides digitals i 15 poden proporcionar senyal PWM. També disposa de 16 pins d'entrades analògiques.

Hi ha diversos pins que permeten fer la comunicació serial amb RS232, aquests pins són:

Taula 17. Pins de comunicació serial per Arduino MEGA 2560.

Serial	Pin RX (Rebuda)	Pin TX (Enviament)
0	0	1
1	19	18
2	17	16
3	15	14

Els pins 2, 3, 18, 19, 20 i 21 es poden configurar com a entrades d'interrupcions, les quals poden ser requerides per l'entrada de les dades de lectura d'alguns sensors.

També cal destacar que els pins 20 (SDA) i 21 (SCL) permeten realitzar una comunicació I2C. Es tracta d'una comunicació que tan sols requereix 2 cables per funcionar dels quals es poden penjar la quantitat de dispositius que es vulgui, seguint una arquitectura de tipus mestre-esclau com es mostra en la següent figura:

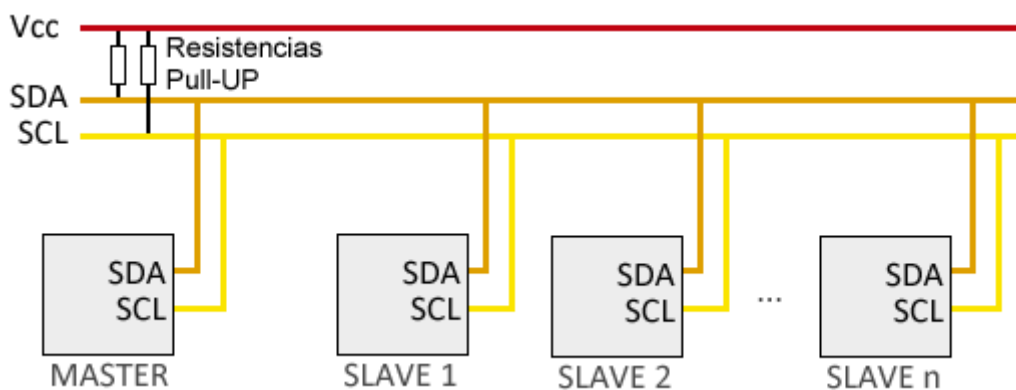


Figura 54. Estructura del sistema de comunicació I2C, on un dispositiu exerceix de mestre mentre tots els altres exerceixen d'esclaus i han de tenir una direcció única. *Font:* <https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>

En aquest sistema, l'Arduino s'alimenta directament amb els 12V de la bateria al pin V_{in} . fa la funció de mestre en la comunicació I2C, mentre que els mòduls PWM es comporten com esclaus.

Amb les plaques Arduino no és necessari instal·lar les resistències anomenades de 'Pull-UP', ja que existeix una llibreria que activa unes resistències internes que fan aquesta funció.

3.4.9.2. Receptor i antena GPS

Ha de transmetre les dades que permetin a l'Arduino definir la trajectòria de la traçada del tractor. En aquest cas s'ha escollit un model de receptor **BX982 de Trimble** amb connexió per dues antenes:

Taula 18. Característiques del receptor GPS.

Fabricant	Trimble
Model	BX982
V_{in}	9-28 V
Ports de comunicació	1x USB, 1x CAN, 1x LAN Ethernet i 3x RS232
Freqüència d'obtenció de dades	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz i 50 Hz
Codi de transmissió de dades	Trimble GSOE
Sistemes de correcció	RTK, DGPS, SBAS
Precisió d'orientació*	<0,09°
Precisió de la velocitat horitzontal	±0,007 m/s
Dimensions	261x140x55 mm

*Amb una separació entre les antenes de 2 metres.



Figura 55. Receptor GPS Trimble BX982.

Els models de les antenes de freqüència L1/L2 escollides són les **BULLET DB GPS L1/L2** també de Trimble:

Taula 19. Característiques de les antenes GPS.

Fabricant	Trimble
Model	BULLET DB GPS L1/L2
V_{in}	5 V
Corrent de treball	<35 mA
Ample de banda	L1: 30 MHz (min) L2: 15 MHz (min)
Cobertura angular	360°



Figura 56. Antenes GPS Trimble BULLET DB GPS L1/L2.

El motiu de l'elecció d'aquest model és què els receptors que permeten la connexió de dues antenes poden obtenir amb més precisió el valor de la orientació del tractor respecte el Nord geogràfic terrestre. Això és degut a què ho calcula traçant una línia entre la posició rebuda per cadascuna de les dues antenes en un instant determinat i mesurant l'angle d'orientació d'aquesta línia amb el Nord, mentre que els sistemes d'una antena requereixen del valor de posició de l'instant anterior per fer el mateix procés, de manera que es perd precisió.

Pel que fa a la comunicació entre el receptor GPS i l'Arduino, aquesta es realitza per mitjà d'un dels ports RS232, connectant els borns RX (recepció) i TX (transmissió) del port als pins corresponents de comunicació amb l'Arduino, de manera que es realitza una connexió creuada del tipus:

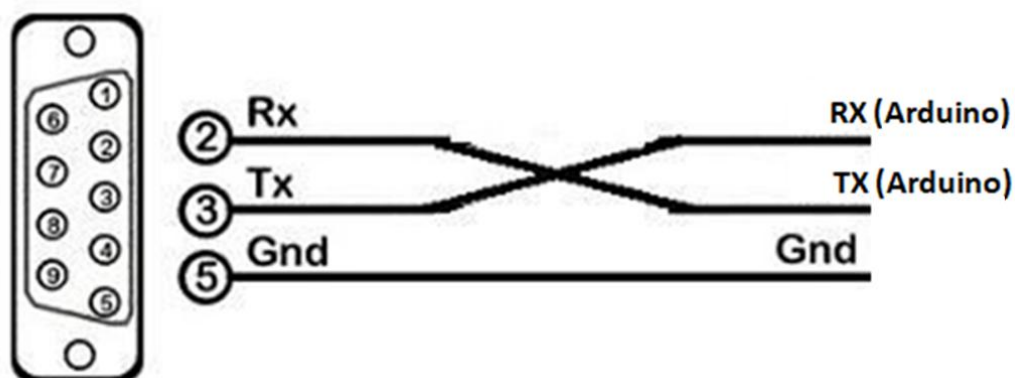


Figura 57. Connexions de la comunicació RS232 del receptor GPS amb l'Arduino.

Hi ha diversos pins del Arduino que permeten dur a terme aquest tipus de comunicació, en aquest cas s'utilitzaran els pins 0 (RX), 1 (TX) i el terra.

El receptor envia els paquets de dades amb un tipus de missatges binaris creats per la mateixa marca anomenats **GSO (General Serial Output Format)**. En aquest cas s'ha de programar per que envii els missatge GSO tipus 8 anomenat *Velocity*. Segons la pàgina web oficial de Trimble, aquest missatge conté les següents dades per cada mesura:

- Velocitat horitzontal, en metres per segon.
- Velocitat vertical, en metres per segon.
- Rumb (*'heading'*), en radians i referenciat al nord magnètic del sistema WGS-84.

En la següent taula, extreta de la pàgina web oficial, es mostra l'estructura de la sentència:

Taula 20. Estructura de la sentència 8 (*Velocity*) del codi Trimble GSO.

Font:<http://www.trimble.com>

Field	Item	Type	Value	Meaning
0	Output record type	Char	08h	Velocity data output record
1	Record length	Char	0Dh, 11D	Bytes in record
2	Velocity flags	Char	See Velocity flags: bit values	Velocity status flags
3-6	Speed	Float	Meters per second	Horizontal speed
7-10	Heading	Float	Radians	True north heading in the WGS-84 datum
11-14	Vertical velocity	Float	Meters per second	Vertical velocity
15-18*	Local heading	Float	Meters per second	Heading in the local datum

*Aquests bits sol s'inclouen si prèviament s'ha carregat un sistema de coordenades local.

Com es pot veure, serà necessari realitzar la conversió de les mesures de rumb de radians a graus en el programa abans de desenvolupar tot el procés de càlcul.

3.4.9.3. Pantalla tàctil

La pantalla tàctil permet al usuari dur a terme la programació dels valors constructius i de consigna que el software requereix per realitzar la regulació, per tant es tracta d'un element molt important pel correcte funcionament del sistema. La pantalla escollida ha estat la **ADAFRUIT 2.8" TFT LCD – ILI9341**.

Taula 21. Característiques de la pantalla.

Fabricant	Adafruit
Model	2.8" TFT LCD-ILI9341
V_{in}	5 V
Resolució	240x320
Dimensions pantalla + placa	56x85x11
Pes	47 g

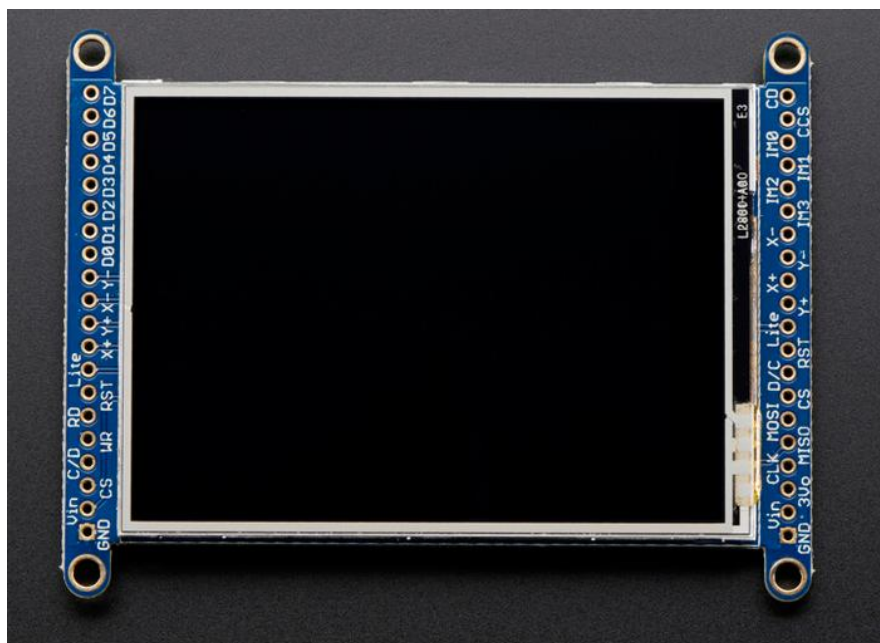


Figura 58. Pantalla Adafruit 2.8" TFT LCD-ILI9341.

La connexió de la pantalla és simple, simplement cal alimentar el mòdul desde l'Arduino amb 5V i el GND i es connecten els pins de dades del TFT amb l'Arduino per realitzar una connexió SPI de la següent manera:

Taula 22. Connexió amb comunicació SPI entre la pantalla i l'Arduino.

Pin Pantalla	Pin Arduino	Descripció (Anglès)
3-5 V	5V	VCC
GND	GND	Ground
CLK	52 (SCK)	Clock (SPI)
MISO	50 (MISO)	Master In Slave Out (SPI)
MOSI	51 (MOSI)	Master Out Slave In (SPI)
CS	53 (SS)	Slave/Chip Select (SPI)
RST	11	Controller Reset
D/C	10	Command Data

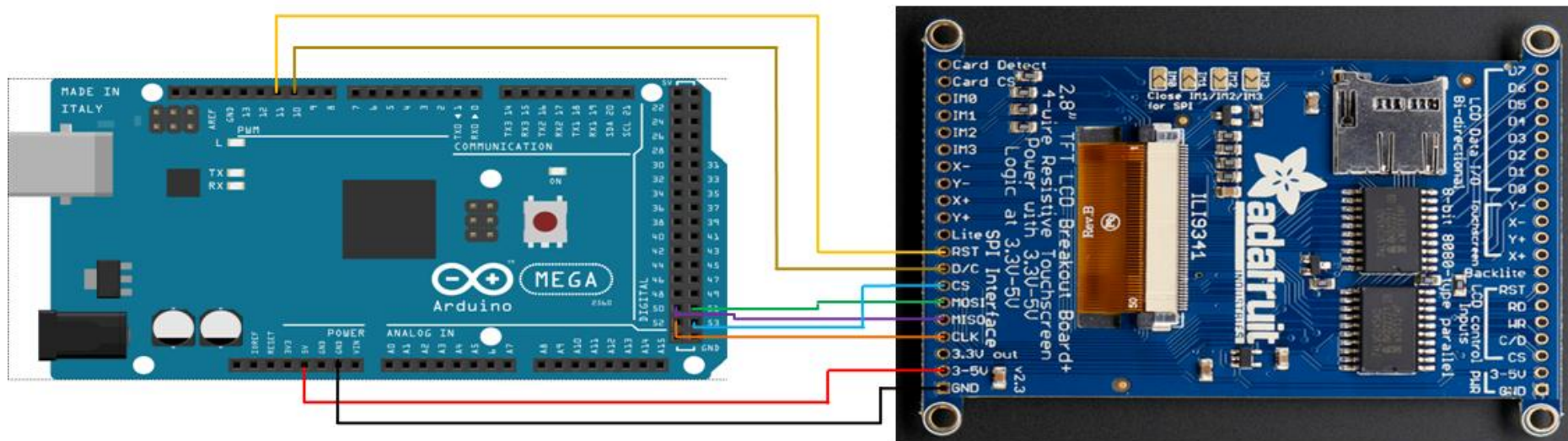


Figura 59. Esquema de la connexió de la pantalla amb l'Arduino.

3.4.9.4. Mòduls PWM

Es tracta d'un controlador de senyals PWM que es pot connectar a la placa central d'Arduino per comunicació I2C i que permet augmentar el nombre de sortides PWM que aquest pot gestionar. El model elegit és el **PCA9685**.

Taula 23. Característiques del mòdul generador de senyals PWM.

Fabricant	NXP Semiconductors
Model	PCA9685
V_{in}	5 V
Sortides PWM	16
Corrent DC sortides	25 mA
Voltatge d'operació	5 V
Alçada	25 mm
Amplada	60 mm
Pes	12 g

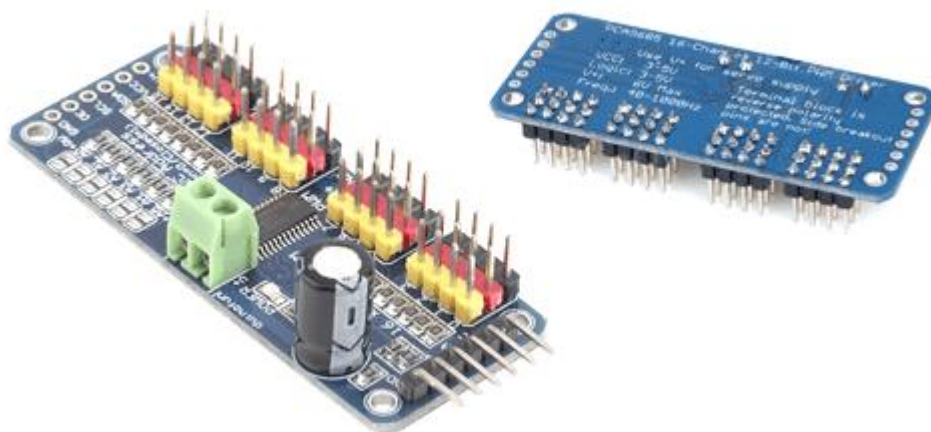


Figura 60. Mòdul controlador de 16 sortides PWM PCA9685. Font: <https://www.luisllamas.es>

La placa disposa d'una entrada d'alimentació a través de la connexió directa al pin Vcc, que ha de ser de 5 V.

Els pins SDA i SCL van connectats als pins 20 i 21 de l'Arduino per realitzar la comunicació I2C.

També és possible subministrar-li un voltatge d'alimentació apart d'un valor entre 5 i 6 V per poder-hi connectar servomotors directament en cas que es volguessin fer servir.

Cada mòdul permet generar 16 senyals PWM amb una freqüència ajustable fins a 1600 Hz i la precisió és de 12 bits. També disposa de 6 pins de direcció, de manera que es poden connectar en una mateixa comunicació I2C fins a 62 mòduls per generar un total de 992 sortides PWM.

Així doncs la connexió entre els elements quedaria de la següent manera:

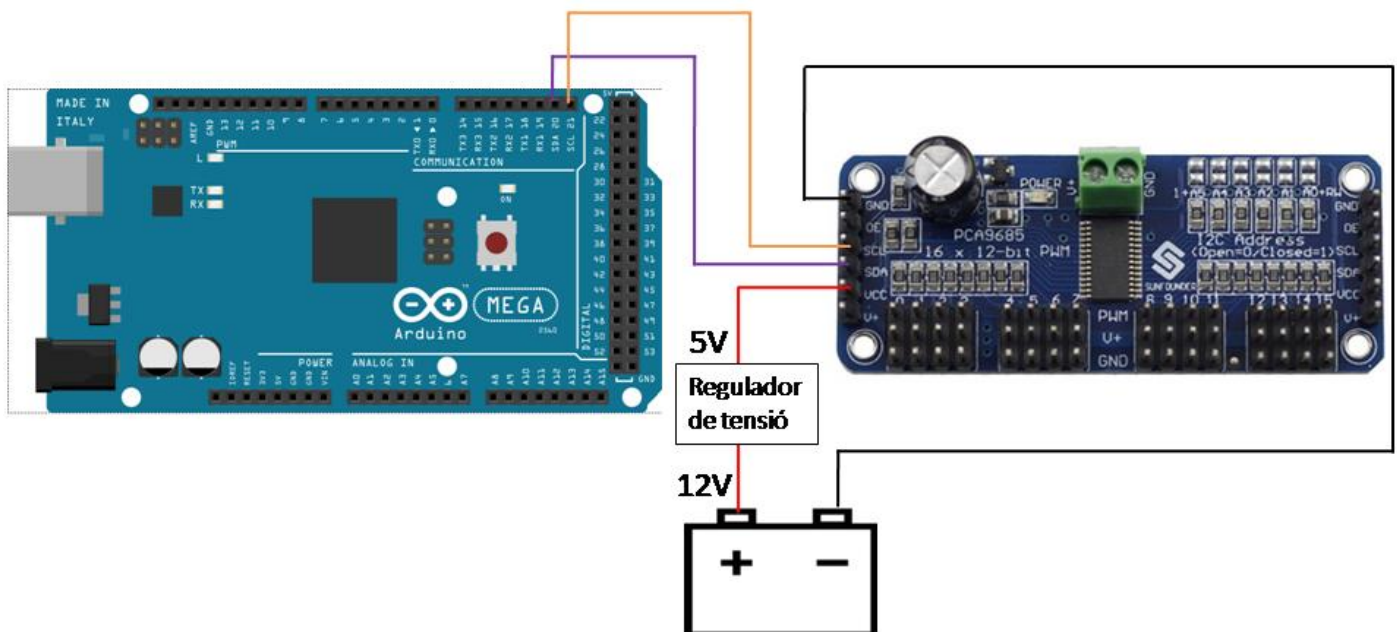


Figura 61. Esquema de la connexió del mòdul PCA9685 amb l'Arduino.

Normalment en els muntatges de mòduls PCA9685, l'entrada de tensió Vcc s'alimenta a través del pin de 5V que proporciona la placa principal de l'Arduino. En el cas del sistema de regulació que es dissenya, degut que l'operació què ha de dur a terme

l'Arduino per fer la regulació és força complexa i requereix del control de diversos mòduls i una part lògica important, aquesta tensió es proporcionarà de la bateria, a través d'un regulador de tensió que redueixi el voltatge de 12V a 5V. D'aquesta manera es garanteix que el corrent subministrat pel mòdul a través de les sortides PWM és suficient com per saturar el transistor.

El regulador escollit és el **LM7805** que té les següents característiques:

Taula 24. Característiques del regulador de tensió.

Fabricant	Fairchild
Model	LM7805
Càpsula	TO-220
$V_{IN,màx}$	35 V
V_{OUT}	5-24 V
$I_{OUT, màx}$	1 A
Temperatura de la unió (T_J)	-40 a 125 °C
Resistència tèrmica Unió-Càpsula (R_{J-C})	5 °C/W
Resistència tèrmica Unió-Ambient (R_{J-A})	65 °C/W

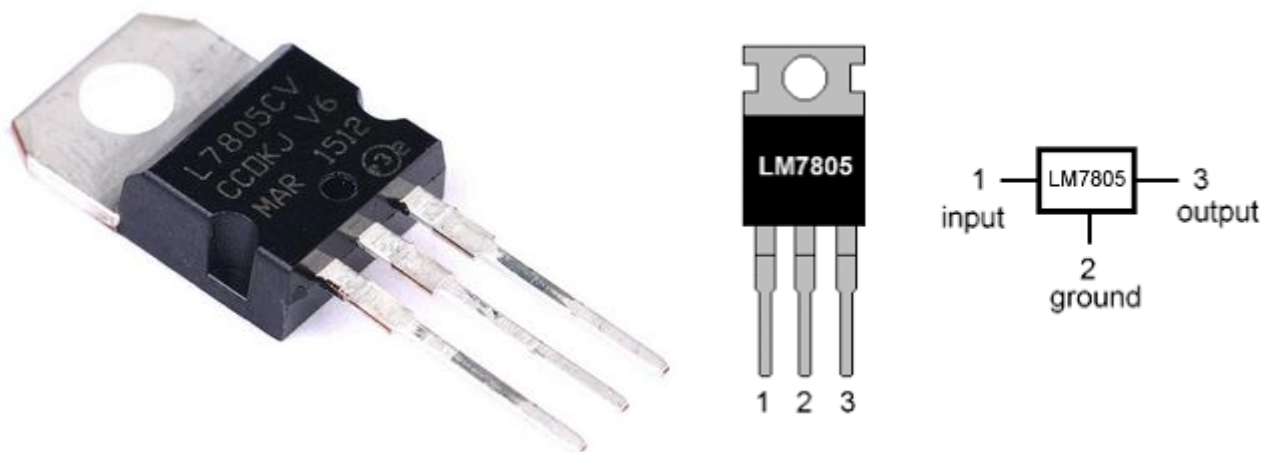


Figura 62. Regulador de tensió LM7805 amb càpsula TO-220 amb indicacions del connexionat de les potes.

Es necessari comprovar si el regulador de tensió necessitarà un dissipador tèrmic:

La temperatura de la unió depèn de la potència dissipada pel regulador i per la resistència tèrmica entre la unió i l'ambient :

$$\Delta T = T_J - T_a = P \cdot R_{J-A} \quad (\text{Eq. 40})$$

$$P \leq \frac{T_J - T_a}{R_{J-A}} = \frac{125 - 40}{65} = 1,3 \text{ W}$$

$$P \leq 1,3 \text{ W}$$

A continuació es calcula quina és la intensitat màxima que pot subministrar el regulador sense requerir dissipador:

$$P = (V_{in} - V_{out}) \cdot I \quad (\text{Eq. 41})$$

$$I \leq \frac{P}{(V_{in} - V_{out})} = \frac{1,3}{(12 - 5)} = 0,186 \text{ A} = 186 \text{ mA}$$

$$I \leq 186 \text{ mA}$$

Es suposa que cada mòdul de sortides PWM disposarà del seu propi regulador de tensió, de manera que si cada sortida suposa un consum de 25 mA segons el fabricant:

$$I = 25 \cdot 16 = 400 \text{ mA}$$

El regulador necessita subministrar 400 mA, per tant és necessari el muntatge d'un dissipador. De la següent taula s'obté la resistència entre la càpsula i el dissipador R_{C-D} :

RESISTENCIA TERMICA CONTENEDOR -DISIPADOR				
Tipo de conenedor	Contacto directo sin mica	Contacto directo y silicona	Contacto con mica	Contacto con mica silicona
TO.5	1	0,7	--	--
TO.39	1	0,7	2	1,5
TO.126	1,4	1	1,4	1,3
TO.220	0,8	0,5	1,4	1,2
TO.202	0,8	0,5	1,4	1,2
TO.152	0,8	0,5	1,2	0,9
TO.90	0,5	0,3	1	0,7
TO.3P.	0,4	0,2	2,1	1,5
TO.59	1,2	0,7	--	--
TO.117	2	1,7	--	--
SOT.48	1,8	1,5	--	--
DIA.4L	1,1	0,7	--	--
TO.66	1,1	0,65	--	--

Figura 63. Resistència tèrmica càpsula-dissipador per TO-220 amb contacte directe sense silicona.

Tornant a aplicar l'equació 40:

$$\Delta T = T_J - T_a = P \cdot R_{J-A}$$

$$R_{J-A} = R_{J-C} + R_{C-D} + R_{D-A}$$

$$R_{D-A} = \frac{\Delta T}{P} - R_{J-C} - R_{C-D} = \frac{125 - 40}{2,8} - 5 - 0,8 = 24,56 \text{ }^{\circ}\frac{C}{W}$$

Aquest valor és la resistència tèrmica màxima que pot tenir el dissipador, per tant cal buscar-ne un que tingui una resistència força inferior, assumint un marge de seguretat.

El dissipador elegit es tracta del model **SK12925,4** del fabricant *Fischer Elektronik*:

Taula 25. Característiques del dissipador.

Fabricant	Fischer Elektronik
Model	SK12925,4
Resistència tèrmica (R_{D-A})	7,8 °C/W
Amplada	25 mm
Alçada	42 mm
Color	Negre



Figura 64. Dissipador tèrmic SK12925,4 amb muntatge per mitjà d'un cargol de mètrica M3.

3.4.9.5. Vàlvules solenoide

Són les encarregades de convertir el senyal polsat elèctric en un moviment físic d'obertura i tancament a través del solenoide. El model seleccionat són les fabricades per CAPSTAN AG.

Taula 26. Característiques de les vàlvules solenoide.

Fabricant	Capstan Ag.
Model	Solenoid Valve
Voltatge d'operació	12 V
Potència	7 W
Corrent de funcionament	~ 0,5 A
Temps de resposta	~ 10 ms



Figura 65. Vàlvula solenoide de Capstan Ag.

El senyal PWM que proporciona la sortida del mòdul PCA9685 és de 5V i de poca corrent, de manera que per si mateix no pot fer funcionar les vàlvules solenoide, les quals treballen a 12V i tenen una potència de 7 Watts. Així doncs és necessari el muntatge d'un transistor que permeti amplificar el senyal PWM per a què aquest pugui fer actuar les vàlvules solenoide:

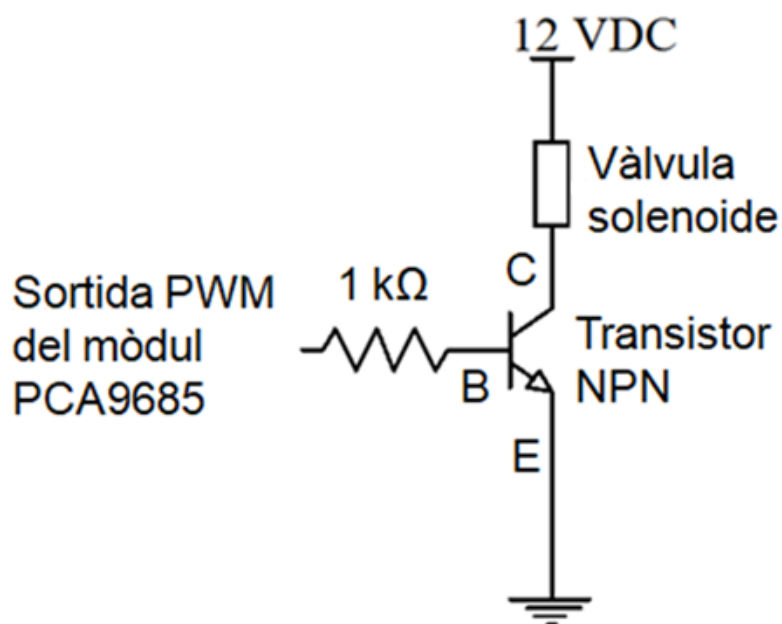


Figura 66. Esquema del muntatge del transistor per amplificar la senyal PWM de sortida del mòdul. S'instal·la una resistència de seguretat en la base d'1 kΩ.

Quan el senyal provinent del mòdul s'activa, el transistor entra en saturació, tancant el circuit entre col·lector i emissor, permetent el pas de corrent per la vàlvula solenoide.

Així doncs, el que s'ha escollit és el model **P2N2222A** de tipus NPN amb format de càpsula TO-92, que és un transistor força utilitzat en l'àmbit de l'electrònica industrial.

Taula 27. Característiques del transistor.

Fabricant	ON Semiconductor
Model	P2N2222A
Tipus	NPN
Càpsula	TO-92
$V_{CE,màx}$	40 Vdc
$I_c, màx$	600 mA
Temperatura de la unió (T_J)	-55 a 150 °C
Resistència tèrmica Unió-Càpsula (R_{J-C})	83,3 °C/W
Resistència tèrmica Unió-Ambient (R_{J-A})	200 °C/W

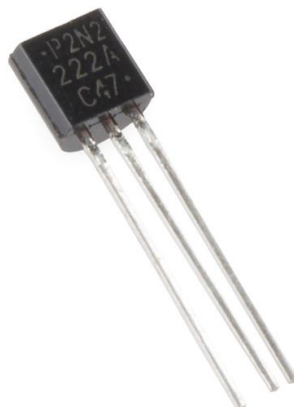


Figura 67. Transistor P2N2222A amb càpsula TO-92

És important comprovar si és necessari muntar un dissipador tèrmic:

La temperatura de la unió depèn de la potència dissipada pel transistor, en aquest cas el corrent del col·lector és de $I_C = 500 \text{ mA} = 0,5 \text{ A}$ i el voltatge entre col·lector i emissor en aquest estat de saturació és de $V_{CEsat} \approx 0,25 \text{ V}$ segons les fulles d'especificacions del transistor. Per tant la potència dissipada és:

$$P = I_C \cdot V_{CEsat} = 0,5 \cdot 0,25 = \mathbf{0,125 \text{ W}} \quad (\text{Eq. 42})$$

Es considera que la temperatura ambient és de 40°C , per contemplar temperatures desfavorables que es pot trobar un transistor muntat en una màquina per treballar al camp. Així doncs:

$$\Delta T = T_J - T_a = P \cdot R_{J-A}$$

$$T_J = P \cdot R_{J-A} + T_a = 0,125 \cdot 200 + 40 = \mathbf{65^\circ\text{C}} \quad (\text{Eq. 43})$$

Segons les dades del fabricant, la unió pot suportar temperatures fins a 150° , de manera que no es requereix d'un dissipador de calor per aquest transistor.

3.4.9.6. Reguladora general de pressió

Es tracta de l'element que regula la pressió general del sistema, de manera que és una de les parts més importants del sistema.

La vàlvula reguladora escollida és el model TEEJET 346BPR-3F-06:

Taula 28. Característiques de la reguladora de pressió.

Fabricant	Teejet
Model	346BPR-3F-06
Voltatge d'operació	12 V
Corrent de funcionament	< 1 A
Temps de cicle	6 segons
Pressió màxima	20 bar
Vies	3



Figura 68. Vàlvula reguladora de pressió Teejet 346BPR-3F-06.

Per dur a terme el control de la vàlvula, aquesta disposa de 2 cables, de manera que segons el sentit del corrent a través d'aquests, la vàlvula gira cap a una direcció o cap a l'altra. Determinar en quina direcció obra o tanca el cabal cap a la barra depèn de la manera en que s'han connectat les 3 vies.

Per tal de poder controlar l'obertura o tancament de la vàlvula utilitzant solament 2 pins de sortida del Arduino, és necessari el muntatge d'un pont en H que permeti variar el

sentit del corrent a través de la vàlvula segons el pin de sortida del Arduino que doni el senyal.

El pont en H escollit és el NJM2675:

Taula 29. Característiques del pont en H.

Fabricant	JRC
Model	NJM2675
Voltatge d'operació	4 a 55 V
Intensitat d'operació	5 a 1200 mA
Voltatge de la lògica	5 V
Entrades de control	2
Sortides per connexió	2

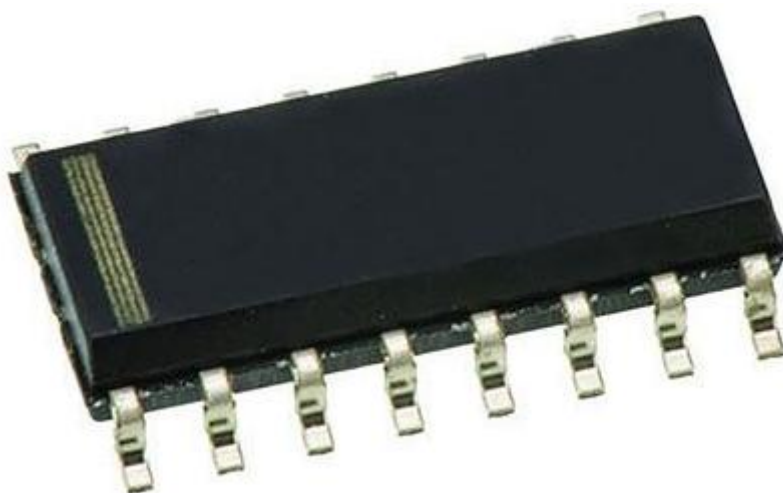


Figura 69. Driver NJM2675 de pont en H.

El diagrama de bloc d'aquest pont és el següent:

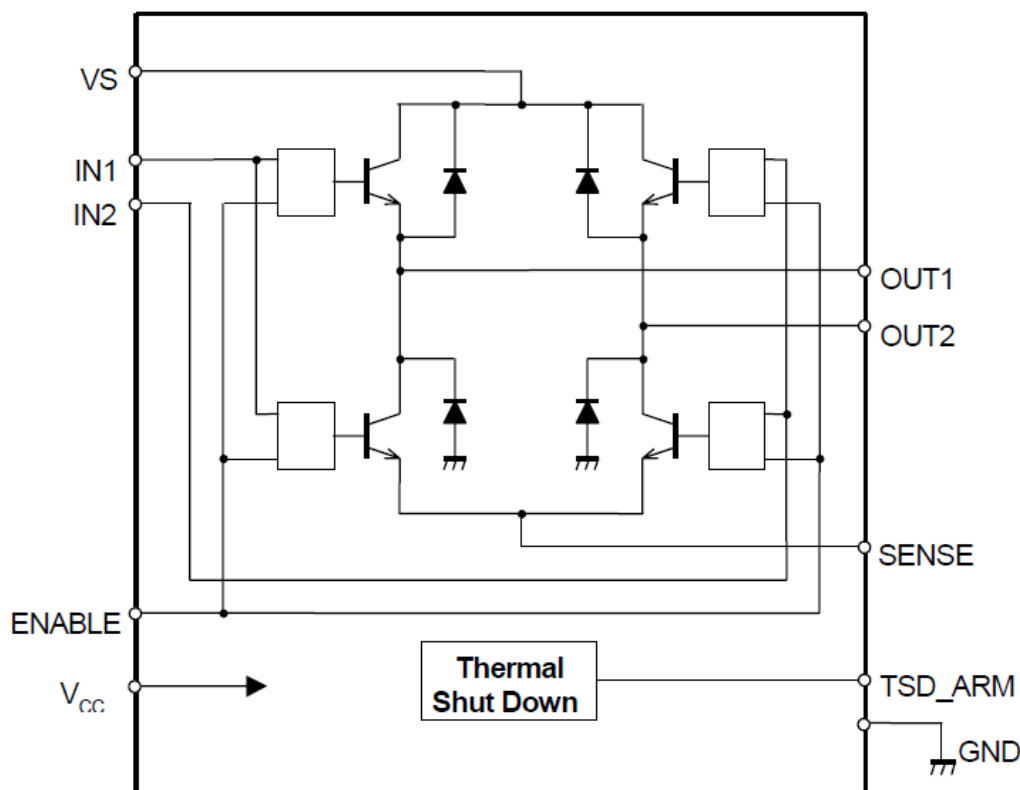


Figura 70. Diagrama de bloc del muntatge del driver NJM2675 de pont en H.

En la fulla de dades del pont es troba l'assignació de cada pin amb la seva funció. Per fer actuar la vàlvula reguladora de pressió aquests són els pins que s'han de connectar:

- **Vs:** Es tracta del voltatge necessari per fer actuar el motor o l'element connectat entre les sortides, en aquest es connecten els 12V de la bateria del tractor per fer actuar la vàlvula reguladora.
- **Vcc:** Es tracta del voltatge que alimenta la petita lògica que incorpora el pont, es connecta directament als 5V del Arduino.
- **IN1:** És una entrada digital que activa el funcionament en un sentit de l'element connectat a la sortida. Es connecta al pin 3 de sortides del Arduino.
- **IN2:** Igual que la entrada 1 (IN1) però fent funcionar l'element de la sortida en sentit contrari.
- **Enable:** Quan rep senyal per aquesta entrada, activa el funcionament general del pont en H. En aquest cas es mantindrà aquesta sempre connectada als 5V del Arduino.

- **OUT1:** És una sortida que es connecta a un dels dos cables del motor i que s'activa quan arriba senyal a l'entrada IN1. Així doncs aquí es connecta directament un dels dos cables de la vàlvula reguladora.
- **OUT2:** De la mateixa manera que en la sortida 1 (OUT1) aquesta s'activa quan el senyal arriba a l'entrada IN2. Es connecta a l'altre cable de la vàlvula.
- **SENSE:** Permet la sortida del corrent. Es connecta a la terra del Arduino.
- **GND:** És la connexió a terra. Es connecta directament amb la del Arduino.

La connexió quedaria de la següent manera:

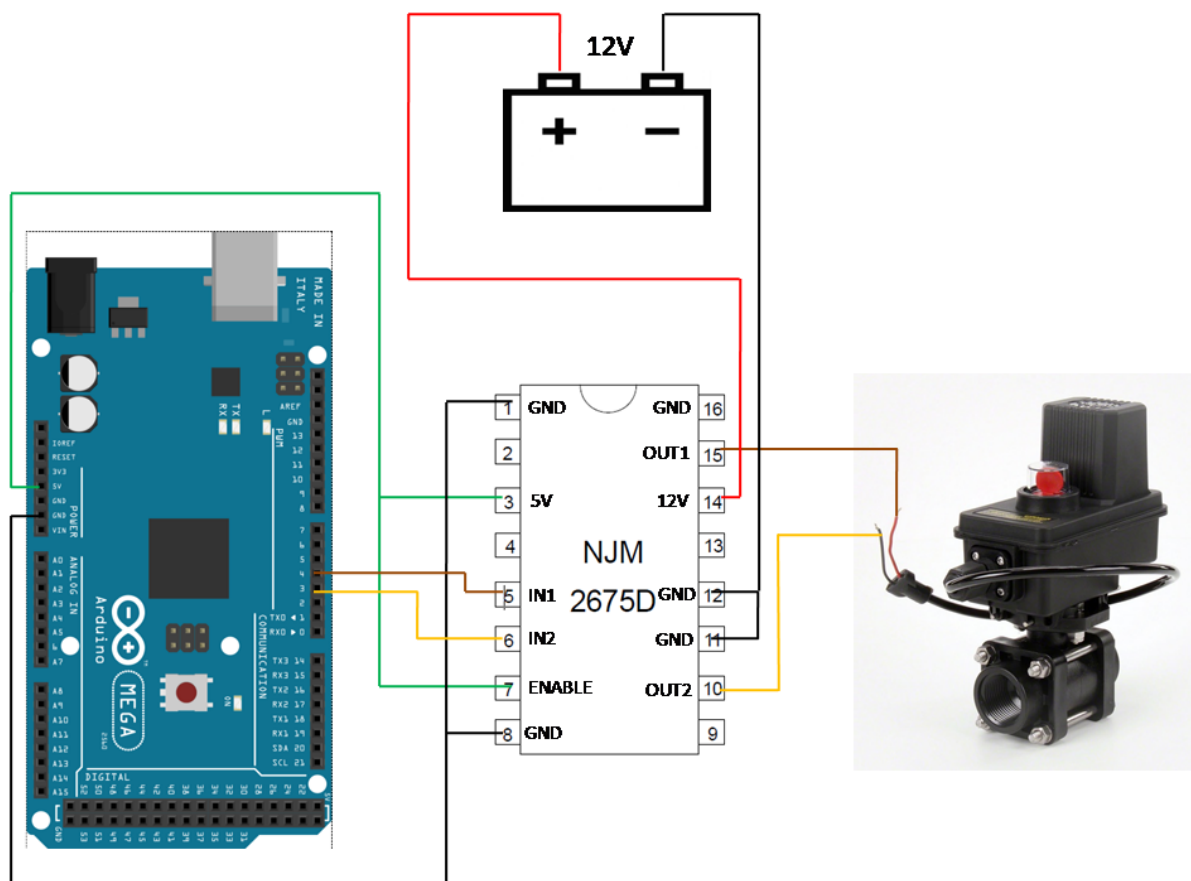


Figura 71. Esquema de la connexió de la vàlvula reguladora de cabal amb l'Arduino a través del pont en H.

Donat que segons el catàleg del fabricant de la vàlvula, la corrent màxima que circula per aquesta és de 0,5 A i és menys de la meitat dels 1,2 A que indica el catàleg del driver del pont en H, es considera que aquest no requereix dissipador tèrmic.

3.4.9.7. Sensor de pressió

Per dur a terme la regulació de la pressió en la línia general, és necessari el muntatge d'un sensor que permeti conèixer la pressió en tot moment en la barra, per tal de mantenir-la dins d'uns marges al voltant del valor establert per l'usuari.

El sensor de pressió escollit es tracta del model **HK3022** i té les següents característiques:

Taula 30. Característiques del sensor de pressió.

Fabricant	Naylamp
Model	HK3022
Voltatge d'operació	5 V
Voltatge de sortida	0,5-4,5 V
Corrent de funcionament	≤10 mA
Rang de pressions	0-8 bar
Temperatura de treball	0-85 °C
Dimensions	26x26x60 mm



Figura 72. Sensor de pressió HK3022.

El sensor disposa de 3 fils connectats de la següent manera:

Vermell (5V): És l'alimentació del sensor, es connecta directament a la sortida de 5V del Arduino.

Groc: És la senyal analògica de la mesura, és compatible per una connexió directa a una entrada analògica del Arduino.

Negre (GND): És la connexió a terra, connectada directament amb la del Arduino.

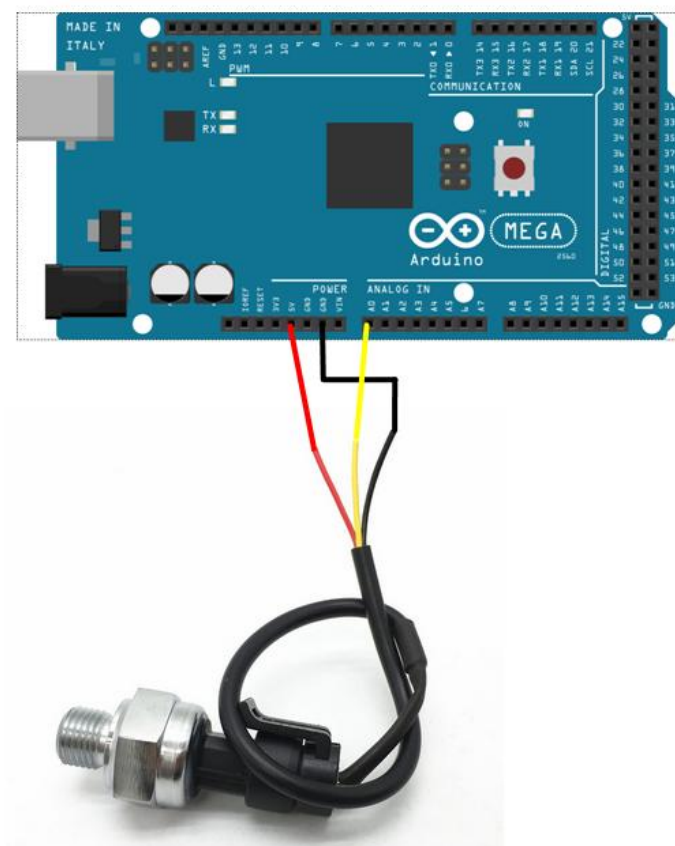


Figura 73. Connexió del sensor de pressió amb l'Arduino.

En la següent figura es mostra la relació entre la pressió que mesura i el senyal que emet:

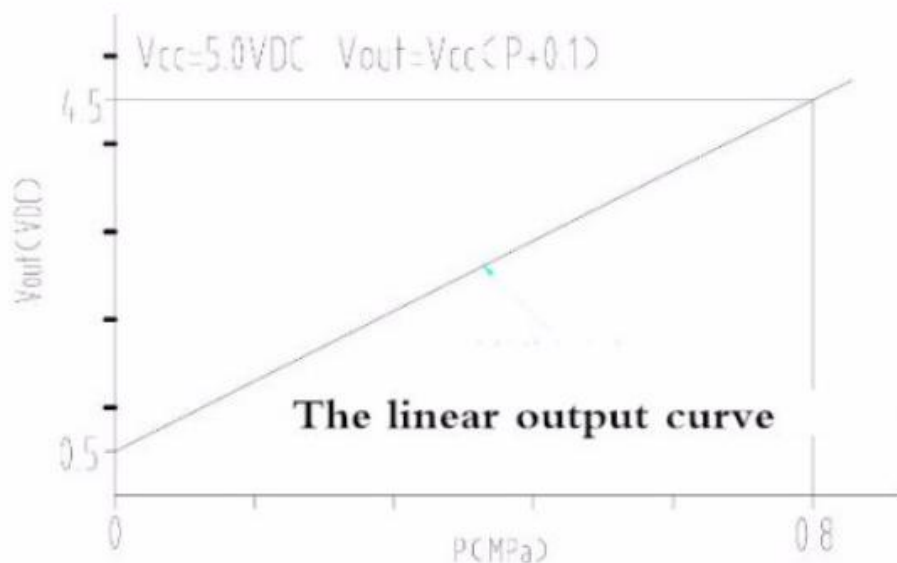


Figura 74. Relació entre la pressió mesurada i el senyal emès, tot i que no s'aprecia gaire bé, es pot veure que el valor mínim de senyal (0,5V) correspon a una mesura de 0 bar, mentre que el valor màxim de 4,5V significa una mesura de 8 bar de pressió.

3.4.9.8. Cabalímetre

El sensor de mesura de cabal escollit és el model YF-DN50 per canonada de 2”:

Taula 31. Característiques del cabalímetre.

Fabricant	Naylamp
Model	YF-DN50
Voltatge d'operació	5 V
Corrent de funcionament	≤15 mA
Sortida	Ona quadrant polsant
Rang de cabals	10-200 L/min
Polsos per litre	450
Pressió màxima	17 bar
Temperatura de treball	5-80 °C
Dimensions	92x58 mm

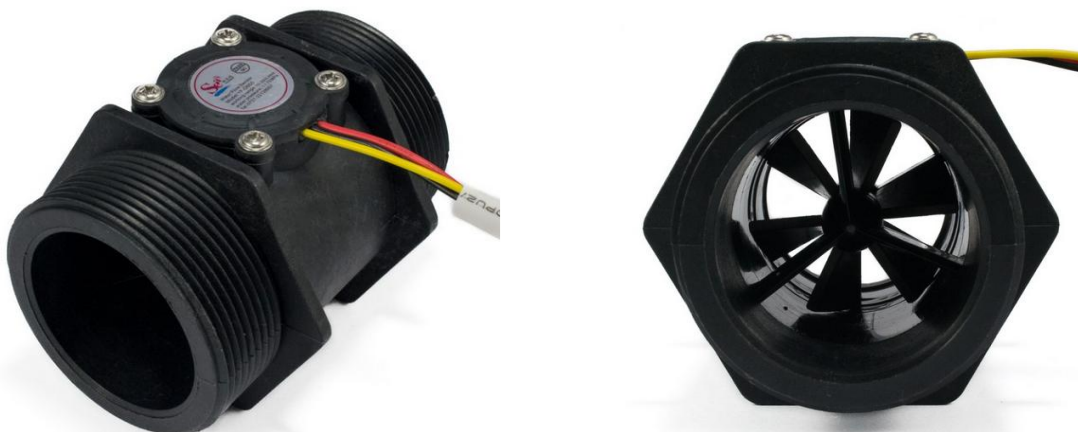


Figura 75. Cabalímetre YF-DN50.

Disposa de 3 fils connectats de la següent forma:

Vermell (5V): És l'alimentació del cabalímetre, es connecta directament a la sortida de 5V del Arduino.

Groc: És la senyal d'interrupcions de la mesura, va connectat a un pin amb entrada d'interrupcions de l'Arduino, com per exemple el número 2 (els pins amb entrades per interrupcions s'han comentat en l'apartat del microcontrolador Arduino MEGA2560).

Negre (GND): És la connexió a terra, connectada directament amb la del Arduino.

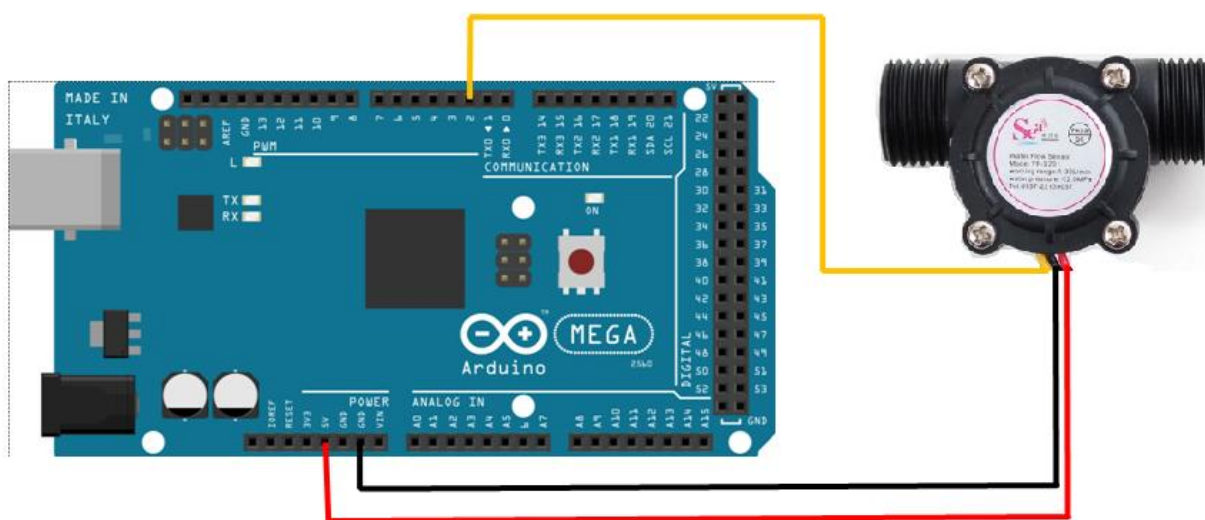


Figura 76. Connexió del cabalímetre amb l'Arduino.

El cabalímetre mesura el flux de líquid pel seu interior a través d'un rotor (turbina) d'aigua que activa un sensor d'efecte Hall, que envia polsos a cada rotació. El sensor es troba aïllat de l'aigua i del rotor, de manera que es manté sempre sec i segur. Amb un calibratge previ, la precisió obtinguda en la medició pot arribar a ser de $\pm 10\%$.

3.4.9.9. *Vàlvula limitadora de pressió*

La seva funció és bàsicament la seguretat de la instal·lació. Aquesta es situa just en l'entrada d'un conducte de retorn situat després de la reguladora de pressió general, la seva funció és garantir que la pressió en la barra no arribi a valors que puguin danyar la instal·lació. Per aquest muntatge es considera que la pressió hauria de limitar-se a uns 8 bar, ja que d'aquesta manera es permet augmentar la pressió de consigna en cas que fos necessari però limitant-la en un valor a partir del qual el sensor de pressió treballaria per sobre del seu rang. La vàlvula escollida és la 98510-PP

Taula 32. Característiques de la vàlvula limitadora de pressió.

Fabricant	Teejet
Model	98510-PP
Regulació	Manual
Diàmetre principal	2"
Diàmetre 'bypass'	1"



Figura 77. Vàlvula limitadora de pressió Teejet 98510-PP.

3.4.9.10. Broquets i portabroquets

Els sistemes de polsos (PWM) requereixen el muntatge d'un portabroquets especial amb acoblament per la vàlvula solenoide així com el muntatge d'un tipus de broquet amb preorifici tal i com s'ha vist en l'apartat 2.3.8. En cas que la màquina no disposés d'aquests elements, es realitzaria el muntatge dels següents pel garantir el correcte funcionament del sistema:

- Broquets Wilger Combo-Jet DR110-15 (tipus 15).
- Portabroquets Wilger 41333-00.
- Preorifici Wilger 40285-15.
- Strainer Wilger 40250-00 (filtre).
- O-ring Wilger 40260-00 (junta tòrica).

En la següent pàgina es mostra una representació de com quedaria el muntatge.



41333-00



41250-00



41285-15



41260-00



DR110-15

Figura 78. Muntatge del broquet en el portabroquets.

4. Pressupost

En aquest pressupost s'inclouen tots els elements que formen part del sistema de regulació, sense tenir en compte els components estructurals de la màquina en sí ja que com s'ha comentat, aquest sistema s'ha de poder incorporar a qualsevol màquina polvoritzadora, tant de nova creació com en una existent a la qual es decideix realitzar-li una substitució del sistema que porta. El valor que aquí es mostra incorpora la part proporcional d'IVA, de manera que no cal afegir cap cost addicional al que es formula.

Les quantitats dels elements que depenen de les dimensions de la barra, com ara els mòduls PWM, han estat escollides segons el muntatge del sistema en una barra de 20 metres amb 41 broquets separats 0,5 metres.

4.1. Estat d'amidaments

Components del sistema de regulació		
Descripció	Unitats	N
Microcontrolador Arduino MEGA 2560 amb alimentació a 12V i 54 pins digitals. Amb placa de dimensions (53,3x101,5) mm i pes de 36 g.	u	1
Receptor GPS Trimble BX 982 amb 3 sortides RS232 i entrada per dues antenes. Les dimensions són: (261x140x55) mm.	u	1
Antena BULLET DB GPS amb doble freqüència L1 i L2.	u	2
Pantalla tàctil Adafruit TFT LCD-ILI9341 de 2,8" de dimensions (56x85x11) i un pes de 47 g.	u	1

Mòdul de sortides PWM PCA9685, amb 16 sortides i funcionament a 5V, d'alçada 25 mm i amplada 60 mm i 12 grams de pes.	u	3
Regulador de tensió LM7805 de Fairchild, amb encapsulat TO-220 i sortida entre 5 i 24V.	u	3
Dissipador de calor SK12925,4 amb resistència tèrmica de 7,8 °C/W, amplada de 25 mm i alçada de 42 mm.	u	3
Vàlvules solenoide CapstanAg de 12V i 7W de potència de resposta ràpida.	u	41
Transistor P2N2222A tipus NPN amb encapsulat TO-92.	u	41
Reguladora de pressió 346BPR-3F-06 de Teejet amb 3 vies, de 12V i menys d'1 A de corrent, amb un temps de cicle de 6 segons.	u	1
Driver pont en H NJM2675 de JRC amb voltatge entre 4 i 55 V i entre 5 i 1200 mA de corrent.	u	1
Sensor de pressió HK3022 de Naylamp, de 5 V i 8 bar de pressió màxima.	u	1
Cabalímetre YF-DN50 de Naylamp, de 5V i un rang de cabal entre 10 i 200 L/min	u	1
Vàlvula limitadora de pressió 98510-PP de Teejet , amb diàmetre principal de 2" i 'bypass' d'1".	u	1
Broquets Wilger Combo-Jet DR110-15 de tipus 15.	u	41

Portabroquets Wilger 41333-00 adequat per sistemes PWM.	u	41
Preorifici Wilger 40285-15.	u	41
Filtre Wilger 40250-00.	u	41
Junta tòrica Wilger 40260-00.	u	41
Cablejat lleuger de menys de 50 grams i capaç de suportar tensions i corrents de fins a 50V i 70A.	m	70

4.2. Pressupost del sistema de regulació

Components del sistema de regulació					
Codi	Descripció	Unitats	N	Preu	Total
1.01	Microcontrolador Arduino MEGA 2560	u	1	35,98 €	35,98 €
1.02	Receptor GPS Trimble BX 982	u	1	3.895,00 €	3.895,00 €
1.03	Antena BULLET DB GPS L1/L2	u	2	296,75 €	593,50 €
1.04	Pantalla tàctil Adafruit TFT LCD-ILI9341 de 2,8"	u	1	29,95 €	29,95 €
1.05	Mòdul de sortides PWM PCA9685	u	3	1,85 €	5,55 €
1.06	Regulador de tensió LM7805	u	3	0,80 €	2,40 €
1.07	Dissipador de calor SK12925,4	u	3	3,99 €	11,97 €
1.08	Vàlvules solenoide CapstanAg	u	41	113,82 €	4.666,62 €
1.09	Transistor P2N2222A	u	41	0,40 €	16,40 €
1.10	Reguladora de pressió 346BPR-3F-06 de Teejet.	u	1	385,00 €	385,00 €

1.11	Driver pont en H NJM2675	u	1	1,52 €	1,52 €
1.12	Sensor de pressió HK3022	u	1	15,77 €	15,77 €
1.13	Cabalímetre YF-DN50	u	1	16,10 €	16,10 €
1.14	Vàlvula limitadora de pressió 98510-PP de Teejet	u	1	99,05 €	99,05 €
1.15	Broquets Wilger Combo-Jet DR110-15	u	41	12,87 €	527,67 €
1.16	Portabroquets Wilger 41333-00	u	41	12,38 €	507,58 €
1.17	Preorifici Wilger 40285-15.	u	41	4,43 €	181,63 €
1.18	Filtre Wilger 40250-00.	u	41	1,40 €	57,40 €
1.19	Junta tòrica Wilger 40260-00.	u	41	0,19 €	7,79 €
1.20	Cablejat	m	70	5,28 €	369,60 €
TOTAL					11.426,48 €

5. Conclusions

Pel que fa a la feina realitzada durant aquest treball, cal destacar la investigació i recerca de mètodes i components que han permès complir amb els objectius plantejats en aquest projecte. Finalment, cal afirmar que el mètode de regulació per ample de polsos (*PWM*) és el sistema que proporciona les condicions més idònies per realitzar correctament una regulació d'aquestes característiques.

Al llarg de tot el treball, s'ha imposat la viabilitat tècnica d'allò que s'estava realitzant per sobre de la econòmica, ja que al tractar-se d'un producte encara no preparat per llençar a la venda, aquesta segona resulta menys important. Així doncs, el cost del present disseny és susceptible de ser millorat.

El que es considera més interessant d'aquest projecte és el mètode desenvolupat per obtenir el radi de la circumferència traçada per la barra en cada instant a partir de les dades d'orientació, temps i velocitat lineal obtingudes del GPS. No obstant també cal destacar que el mètode de l'ajust circular no ha funcionat correctament.

Per tal de poder executar el prototip i millorar el seu funcionament, la línia de treball a seguir seria la de realitzar les proves necessàries per poder treure la corba experimental del cabal real que proporciona el broquet segons el cicle de treball de la vàlvula.

6. Referències bibliogràfiques

Llibres:

Tecnología de la pulverización de productos fitosanitarios sobre las plantas cultivadas, de Porras Piedra, A. i Porras Soriano, A.

Castilla la Mancha: Publicaciones Universidad de Castilla-La Mancha.

Aplicación de productos fitosanitarios: Técnicas y equipos, de Vázquez Gallego J.

Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 2004.

Cultivos tradicionales, de Leonard D.

Washington DC.: Peace Corps Information Collection & Exchange, Desembre de 1981.

Curs de nivell qualificat de manipulador i aplicador de productes fitosanitaris, redactat per l'equip de producció de manuals tècnics del Servei de Formació Agrària.

Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural, Febrer de 2009.

Pulse Width Modulated (PWM) Technology for Liquid Application, de A. Sharda et al.

Kansas, Kansas State University, Octubre de 2016.

PinPoint II Operator and Maintenance Manual, de CapstanAg.

Topeka (Kansas), Capstan Ag Systems, Inc. 2016.

Fonts web:

Mètodes matemàtics per calcular la trajectòria circular:

<http://www.had2know.com/academics/best-fit-circle-least-squares.html>

<https://www.ctspedia.org/do/view/CTSpedia/LinearRegression>

<http://www.public.asu.edu/~gwaissi/ASM-e-book/module403.html>

Sistemes PWM:

<http://sprayers101.com/pulse-width-modulation-2/>

<http://sprayers101.com/pulse-width-modulation-for-newbies/>

https://grdc.com.au/data/assets/pdf_file/0023/234716/17grdcsm17pulsewidthmodulationsystems.pdf.pdf

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231301/>

Mecatrònica:

http://www.naylampmechatronics.com/blog/41_Tutorial-M%C3%B3dulo-Controlador-de-servos-PCA9685.html

<https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>

<https://www.luisllamas.es/controlar-16-servos-o-16-salidas-pwm-en-arduino-con-pca9685/>

<https://www.luisllamas.es/esquema-de-patillaje-de-arduino-pinout/>

<http://www.arduino.org/products/boards/arduino-mega-2560>

http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/heatsinks/A04/Extruded%20heatsinks%20for%20PCB%20mounting/VA/SK12925,4STS/index.xhtml

<http://www.naylampmechatronics.com/sensores-liquido/352-sensor-de-flujo-de-agua-2-yf-dn50.html>

<http://www.naylampmechatronics.com/sensores-liquido/318-sensor-de-presion-hk3022-05mpa.html>

<http://www.trimble.com/gnss-inertial/bx982.aspx?dtID=overview&>

<http://teejet.it/spanish/home/literature/catalogs/catalog-51a.aspx>

<http://www.wilger.net/all-wilger-products/?lang=es>

<https://capstanag.com/>

Fonts del campus virtual:

- Mecànica de fluids: Pèrdues de càrrega.
- Mètodes numèrics: Interpolació polinòmica i equacions no lineals.
- Teoria de Mecanismes: Cinemàtica del sòlid rígida.
- Mecatrònica II: Elements de regulació i control (vàlvules).
- Mecatrònica III: Transistors i sistemes de control.



7. Annexes

7.1. Codi MATLAB

7.1.1. Data

```
%Arxiu per carregar les dades per dur a terme la simulació

%Paràmetres constructius de la barra
Lb=21; %Longitud de treball efectiva de la barra (m)
sb=0.5; %Separació entre broquets (m)
nb=41; %nombre de broquets en la barra
bc=(nb/2)+0.5; %posició j de la boquilla central
AB=1; %Amplada de treball efectiva per broquet (m)

%Paràmetres de consigna
d=200; %Dosi de consigna, en l/ha
DCc=65; %Duty Cycle mitjà
DCmin=30; %Duty Cycle mínim
PT=3; %Pressió de treball en bar

%Dades obtingudes del GPS
t=[0.2,0.4,0.6,0.8,1]; %Temps transcorregut fins cada mesura (s)
th=[2,1,359,357,356]; %Rumb (°)
V=12/3.6; %Velocitat del centre de la barra en m/s
```

7.1.2. Script general (Simulacions 1 i 2)

```
%Simulació del software de regulació del cicle de treball (DC)

%Entrada de dades
Data

%Càlcul de la trajecòria per RL
[w,rc]=RL(th,t,V);

%Distribució dels radis de cada broquet (m)
for j=1:nb
    r(j)=rc+(w/abs(w))*(bc-j)*sb;
end
```



```
%Distribució de velocitats (m/s)
if rc==Inf
    v=ones(1,nb)*V;
else
    v=abs(w)*r;
end

%Distribució de cabals (L/min)
Q=(d*AB*60)/10^4*v;

%Càlcul de la corba característica del broquet
[Qf]=QfBroq(PT);

%Constant de la relació lineal entre cabal i DC
C=Qf/100;

%Distribució dels cicles de treball de la barra
vDC=Q/C;
for i=1:length(vDC)
    if vDC(i)>100
        vDC(i)=100;
    elseif vDC(i)<DCmin && vDC(i)>(DCmin/2)
        vDC(i)=DCmin;
    elseif vDC(i)<(DCmin/2)
        vDC(i)=0;
    else
        end
end

%Funció indicadora velocitat per a DC assignat
[vA]=Vela(DCc,C,d,AB);
fprintf('\nLa velocitat de treball adequada és de %.2f km/h\n\n',vA)

%Representació gràfica
plot(1:nb,vDC)
hold on
plot(1:nb,vDC,'.')
axis([0 42 0 100]);
title('Distribució de Duty Cycle(%) en les vàlvules de la barra')
xlabel('Nº de broquet en la barra')
ylabel('DC (%)')
grid on
```



7.1.3. Regressió lineal (RL)

```
%Rutina per ajustar amb una línia diverses mesures d'angle d'orientació respecte
el Nord
%en diferents instants de temps, de manera que el pendent de la recta
%representa aproximadament la velocitat angular de l'objecte

function [w,R]=RL(th,t,v)

%Correcció de les dades per tal d'evitar errors d'escala
[thc]=corrRL(th);

Mth=sum(thc)/length(thc); %Orientació mitjana
Mt=sum(t)/length(t); %Mitjana dels instants de temps

thP=(sum((thc-Mth).*(t-Mt)))/(sum((t-Mt).^2)) %Velocitat angular (°/s)

%Càlcul del radi
w=(thP*pi)/180; %Velocitat angular (rad/s)
R=abs(v/w); %Radi de la trajectòria (m)
end
```

7.1.4. Correcció de les dades d'entrada en la regressió lineal (corrRL)

```
%Subprograma per a la correcció de les dades d'entrada en el mètode de la
%regressió linial, per tal d'evitar errors d'escala

function [thc]=corrRL(th)
n=length(th)-1; %Nombre d'espais entre les dades del vector d'orientacions
thc=th;
SIG=0; %Serveix per tenir en compte el signe de la diferència
for i=1:n
    DIF(i)=th(i+1)-th(i);
    if abs(DIF(i))>180
        k=i;
        SIG=sign(DIF(i));
    else

    end
end
if SIG==-1;
    thc(1:k)=thc(1:k)-360;
elseif SIG==1;
    thc(k+1:n+1)=thc(k+1:n+1)-360;
else
```



```
end  
end
```

7.1.5. Estudi de l'ajust del mètode de RL

```
%Rutina per simular l'ajust d'una circumferència de 100 metres a través de  
%la regressió lineal amb una generació d'error prèvia de les dades  
%d'entrada  
%Radi 100m ; 5 mesures  
  
%Dades d'entrada  
TH=[0,8,16,24,32]; %Orientació en cada instant (°)  
t=[0,1,2,3,4]; %Instant de temps de la mesura (s)  
v=3.5; %Velocitat lineal d'avançament (m/s)  
n=length(TH);  
for i=1:100  
%Generació d'error  
for k=1:n  
th(k)=(0.5-(rand*0.5*2))+TH(k);  
end  
  
%Correcció de les dades per tal d'evitar errors d'escala  
[thc]=corrRL(th);  
  
Mth=sum(thc)/length(thc); %Orientació mitjana (°)  
Mt=sum(t)/length(t); %Mitjana dels instants de temps  
(s)  
thP=(sum((thc-Mth).*(t-Mt)))/(sum((t-Mt).^2)); %Velocitat angular (°/s)  
tho=Mth-thP*Mt; %Terme independent de la recta  
(°)  
  
%Càlcul del radi  
w(i)=(thP*pi)/180;  
R(i)=v/w(i);  
end  
  
%Teoria de probabilitat  
Mitjana=(sum(R))/length(R);  
sigma2=((sum(R.^2))/length(R))-Mitjana^2; %Variança  
sigma=sigma2^0.5; %Desviació  
%Representació gràfica  
histfit(R,50)  
title('Ajust circumferència 100m amb 5 mesures')  
xlabel('Radi de la circumferència ajustada (m)')  
ylabel('Nº de vegades que s''ha obtingut el valor')
```



```
legend('Histograma dels valors de radi obtinguts','Distribució dels radis obtinguts')
```

7.1.6. Cabal del broquet (QfBroq)

```
%Càlcul del Qf del broquet segons la pressió de treball marcada  
%S'utilitza el mètode de Newton-Raphson per interpolar la corba
```

```
function [Qf]=QfBroq(PT)
```

```
%Les dades del broquet tipus 15 de Wilger que s'ha escollit són:  
P=[20,25,30,40,50,60]; %psi  
Q=[1.06,1.19,1.30,1.50,1.68,1.84]; %US GPM
```

```
%Es converteix a les unitats amb que volem treballar
```

```
P=P*(2.7579/40); %a bar  
Q=Q*(5.6775/1.5); %a lpm
```

```
%Definició dels paràmetres de còmput
```

```
eps=1e-8; %error assumible  
nmax=15; %nombre màxim d'iteracions  
J=zeros(3);
```

```
%Punt Inicial
```

```
a=1; b=1; c=1;  
F(1)=sum(2*(P.^2).*(a*(P.^2)+b*P+c-Q));  
F(2)=sum(2*P.*(a*(P.^2)+b*P+c-Q));  
F(3)=sum(2.*(a*(P.^2)+b*P+c-Q));  
F=F';
```

```
%Inici procés iteratiu de Newton-Raphson
```

```
er=10;  
n=0;  
while er>=eps && n<=nmax  
    %Jacobiana  
    J(1,1)=sum(2.*P.^4);  
    J(1,2)=sum(2.*P.^3);  
    J(1,3)=sum(2.*P.^2);  
    J(2,1)=sum(2.*P.^3);  
    J(2,2)=sum(2.*P.^2);
```



```
J(2,3)=sum(2.*P);
J(3,1)=sum(2.*P.^2);
J(3,2)=sum(2.*P);
J(3,3)=2*length(P);
DI=-J\F;
a=a+DI(1);
b=b+DI(2);
c=c+DI(3);
F(1)=sum(2*(P.^2).*(a*(P.^2)+b*P+c-Q));
F(2)=sum(2*P.*(a*(P.^2)+b*P+c-Q));
F(3)=sum(2.*(a*(P.^2)+b*P+c-Q));
er=F'*F;
n=n+1;
end
if n>=nmax
    disp('S''EXCEDEIX n° ITERACIONS')
end
Qf=a*PT^2+b*PT+c;
end
```

7.1.7. Velocitat d'avançament adequada (Vela)

%Rutina per simular el funcionament del subprograma de càlcul de la
%velocitat adequada per treballar amb el DC mitjà seleccionat

```
function [vA]=Vela(DCc,C,d,AB)
QA=DCc*C;
vA=(QA*10^4)/(d*AB*60);
vA=round(vA*3.6,1);
end
```

7.1.8. Càlcul pèrdues de càrrega en la barra (CalculPDC)

```
clear all
%Programa per calcular les pèrdues de càrrega entre el centre de la barra i
%la punta

%Dades d'entrada
P1=3; %Pressió al punt 1(centre) (bar)
d=250; %Dosi de consigna (l/ha)
vt=15; %Velocitat d'avançament (km/h)
vt=vt/3.6; %Velocitat d'avançament (m/s)
L=15; %Longitud de la meitat de la barra (m)
epsilon=0.0024; %Rugositat del tub d'acer inox (mm)
D=0.025; %Diàmetre interior del tub (m)
visc=1.006e-06; %visc. cinemàtica de l'aigua (m^2/s)
```



```
g=9.81; %gravetat terrestre (m/s^2)
ro=1000; %Densitat de l'aigua (kg/m^3)
%Càlculs
Q=(d*vt*L)/10^7;
vf=(4*Q)/(pi*D^2);
Re=(vf*D)/visc;
f=1.325/log(epsilon/3.71/(1000*D)+5.74/Re^.9)^2;
%Vector per representar l'evolució de les pèrdues al llarg de la barra
long=0:0.2:L;

%Càlcul de les pèrdues de càrrega
h12=(f*long*(vf^2))/(2*g*D);
dif=ro*g*h12;
caig=dif/10^5;
DP=P1-caig;
TPCP=(caig/P1)*100;

%Representació
fprintf('A l''extrem de la barra, la pressió és de %.2f bar, un %.2f%% més  
baixa\n',DP(length(long)),TPCP(length(long)));
plot(long,DP,'R','linewidth',2)
axis ([0 15 0 5]);
grid on
title('Pèrdues de càrrega al llarg de la barra');
xlabel('Distància al centre de la barra (m)'); ylabel('Pressió (bar)');
```

7.1.9. Script figura 53, Gràfic Simulació 3

```
clear all
%Simulació del software de regulació del cicle de treball (DC)
%gràfica DC,w vs T

Data %Entrada de dades

Aw=0:1:360;
w=sind(Aw)*0.2;
for i=1:361
    rc=V/abs(w(i));
    %Distribució de velocitats
    for j=1:nb
        r(j)=rc+(w(i)/abs(w(i)))*(bc-j)*sb;
    end
    if rc==Inf
        v=ones(1,nb)*V;
    else
        v=abs(w(i))*r;
```




```
end
%Distribució de cabals
Q=( (d*AB*60)/10^4)*v; %lpm
%Cicles de treball per cada broquet
[Qf]=QfBroq(PT); %lpm
C=Qf/100; %Constant de la relació lineal
vDC=Q/C;
for k=1:length(vDC)
    if vDC(k)>100
        vDC(k)=100;
    elseif vDC(k)<DCmin && vDC(k)>(DCmin/2)
        vDC(k)=DCmin;
    elseif vDC(k)<(DCmin/2)
        vDC(k)=0;
    else
        end
end
vDC1(i)=vDC(1);
vDCj(i)=vDC(nb);
end

plot((1:i),vDCj,'g')

title('Evolució dels diferents DC sobre una variació de la velocitat angular')
hold on
plot((1:i),vDC(1)*ones(1,361),'k')
[ha,e1,e2]=plotyy(1:i,vDC1,1:i,w);
xlabel('Temps');
axes(ha(1)) %eix de l'esquerra
axis([0 361 0 100]);
grid on
ylabel('DC (%)');
axes(ha(2)) %eix de la dreta
axis([0 361 -1 1]);
ylabel('w (rad/s)');
grid on
hold on
legend('w','DCj','DCc','DC1')
plot((1:i),vDCj)
plot((1:i),vDC(1)*ones(1,361))
```

7.1.10. Estudi de l'ajust del mètode de l'ajust circular 'circlefit'

```
%Rutina per comprovar la precisió del mètode del 'circlefit' simulant una
%traçada del tractor de 100 metres de radi en un pivot.
%Per 10 punts
```



%Coordenades exactes

```
xy(:,1)=[282595.72,282595.73,282595.78,282595.86,282595.96,282596.10,282596.27,282596.47,282596.69,282596.95];
```

```
xy(:,2)=[4623256.14,4623257.88,4623259.63,4623261.37,4623263.12,4623264.86,4623266.59,4623268.33,4623270.06,4623271.78];
```

```
n=length(xy(:,1));
```

%Nombre de punts a ajustar.

```
for i=1:50
```

%Generació d'error

```
for k=1:n
```

```
XY(k,1)=(0.2-(rand*0.2*2))+xy(k,1);
```

```
XY(k,2)=(0.2-(rand*0.2*2))+xy(k,2);
```

```
end
```

%Muntatge i resolució del sistema d'equacions lineals

```
M=zeros(3);
```

```
RHS=zeros(3,1);
```

```
M(1,1)=sum(XY(:,1).^2);
```

```
M(2,1)=sum(XY(:,1).*XY(:,2));
```

```
M(1,2)=M(2,1);
```

```
M(2,2)=sum(XY(:,2).^2);
```

```
M(3,1)=sum(XY(:,1));
```

```
M(1,3)=M(3,1);
```

```
M(3,2)=sum(XY(:,2));
```

```
M(2,3)=M(3,2);
```

```
M(3,3)=n;
```

```
RHS(1)=sum((XY(:,1).^2+XY(:,2).^2).*XY(:,1));
```

```
RHS(2)=sum((XY(:,1).^2+XY(:,2).^2).*XY(:,2));
```

```
RHS(3)=sum((XY(:,1).^2+XY(:,2).^2));
```

```
CO=M\RHS;
```

```
xo=CO(1)/2;
```

```
yo=CO(2)/2;
```

```
R(i)=.5*(CO(1)^2+CO(2)^2+4*CO(3)).^0.5;
```

```
End
```

%Teoria de probabilitat

```
Mitjana=(sum(R))/length(R);
```

```
sigma2=((sum(R.^2))/length(R))-Mitjana^2;
```

%Variança

```
sigma=sigma2^0.5;
```

%Desviació

%Representació gràfica

```
histfit(R,50)
```

```
title('Ajust circumferència pivot')
```

```
xlabel('Radi de la circumferència ajustada')
```

```
ylabel('Nº de vegades que s''ha obtingut el valor')
```

```
legend('Histograma dels valors de radi obtinguts','Distribució dels radis obtinguts')
```

```
figure
```

```
plot(0:49,R,'r')
```

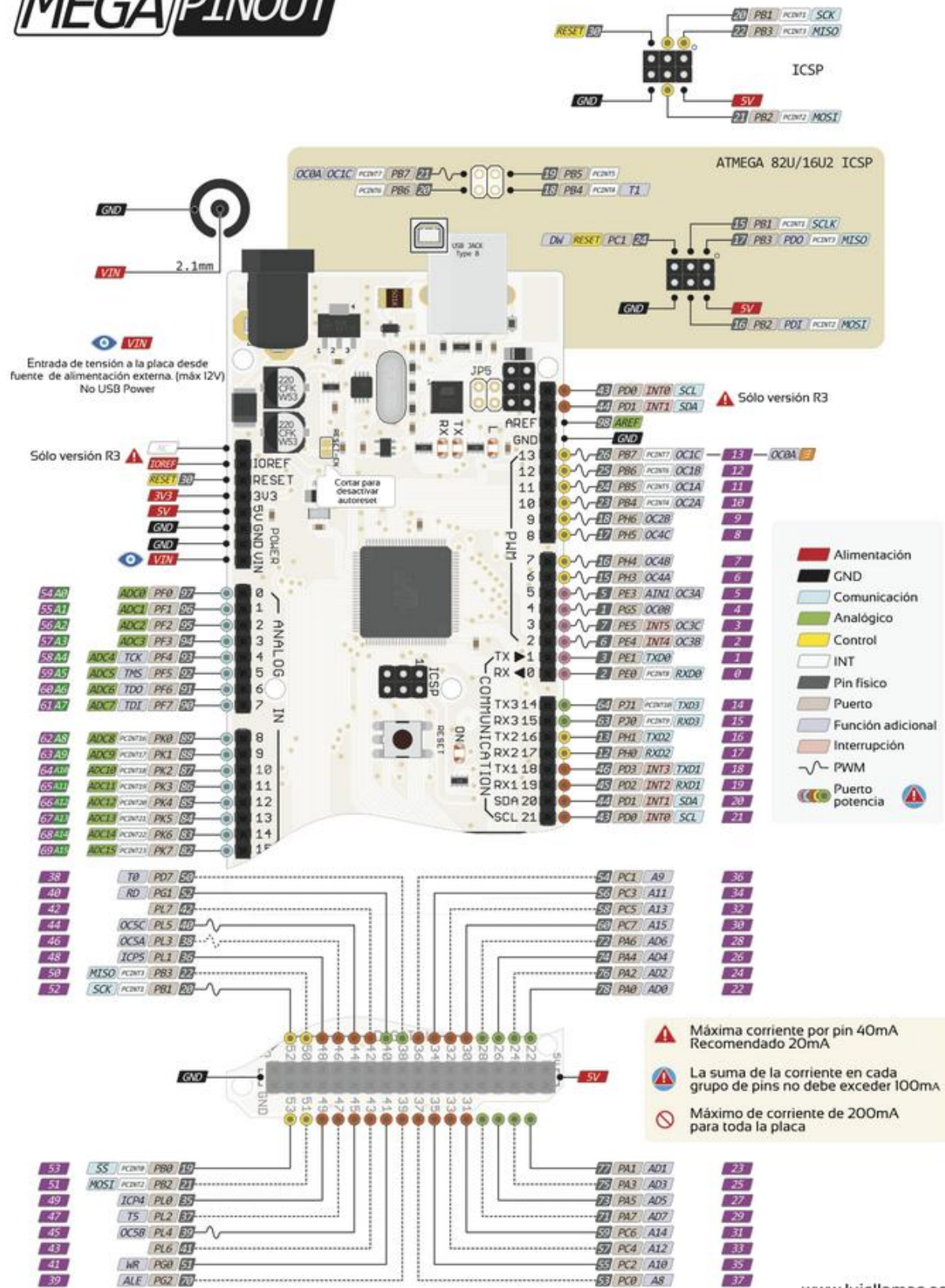
```
title('Resultats ajust circumferència 100m amb 5 mesures')
```

```
xlabel('Nº de iteracions')
```

```
ylabel('Radi obtingut (m)')  
grid on
```

7.2. Catàlegs (A partir de la pàgina 128)

MEGA PINOUT



TRIMBLE BX982 GNSS MODULE

TECHNICAL SPECIFICATIONS

- Position Antenna based on 220 Channel Maxwell 6 chip:
 - GPS: Simultaneous L1 C/A, L2E, L2C, L5
 - GLONASS: Simultaneous L1 C/A, L2 C/A, L2 P, L3 CDMA¹³
 - BeiDou: B1, B2
 - SBAS: Simultaneous L1 C/A, L5
 - Galileo: Simultaneous L1 BOC, E5A, E5B, E5AltBOC²
 - QZSS: L1 C/A, L1 SAIF, L2C, L5
 - Vector Antenna based on second 220 Channel Maxwell 6 chip:
 - GPS: Simultaneous L1 C/A, L2E, L2C
 - GLONASS: Simultaneous L1 C/A, L2 C/A, L2 P
 - BeiDou: B1
 - Advanced Trimble Maxwell Custom GNSS Technology
 - High precision multiple correlator for GNSS pseudorange measurements
 - Unfiltered, unsmoothed pseudorange measurements data for low noise, low multipath error, low time domain correlation and high dynamic response
 - Very low noise GNSS carrier phase measurements with <1 mm precision in a 1 Hz bandwidth
 - Proven Trimble low elevation tracking technology
 - 1 USB port
 - 1 CAN port
 - 1 LAN Ethernet port:
 - Supports links to 10BaseT/100BaseT networks
 - All functions are performed through a single IP address simultaneously—including web GUI access and raw data streaming
 - Network Protocols supported
 - HTTP (web GUI)
 - NTP Server
 - NMEA, GSOE, CMR etc over TCP/IP or UDP
 - NTripCaster, NTripServer, NTripClient
 - mDNS/uPnP Service discovery
 - Dynamic DNS
 - eMail alerts
 - Network link to Google Earth
 - Support for external modems via PPP
 - 3 x RS232 ports
 - Baud rates up to 460,800
 - 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 & 50 Hz positioning outputs (depends on installed option)
 - Up to 50 Hz raw measurement & position outputs
- Reference outputs/inputs . . . CMR, CMR+,SCMRX, RTCM 2.1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.1¹²
- Navigation outputs ASCII: NMEA-0183 GSV, AVR, RMC, HDT, VGK, VHD, ROT, GGK, GGA, GSA, ZDA, VTG, GST, PJT, PJK, BPQ, GLL, GRS, GBS and Binary: Trimble GSOE
- Control Software: HTML web browser. Internet Explorer, Firefox, Safari, Opera, Google Chrome
 - 1 Pulse Per Second Output

POSITIONING SPECIFICATIONS³

Mode	Accuracy ⁴	Latency ⁵	Maximum Rate
Single Baseline RTK	0.008 m + 1 ppm Horizontal	<20 ms	50 Hz
RTK (<50 km)	0.015 m + 1 ppm Vertical		
DGPS	0.25 m + 1 ppm Horizontal	<20 ms	50 Hz
	0.50 m + 1 ppm Vertical		
SBAS ⁶	0.50 m Horizontal	<20 ms	50 Hz
	0.85 m Vertical		

RTK initialization time³ typically <10 seconds
 RTK initialization reliability³ typically >99.9%

HEADING SPECIFICATIONS

Baseline	Accuracy ⁴	Maximum Rate
2 m	<0.09°	50 Hz
10 m	<0.05°	50 Hz

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Time to First Fix (TTFF)⁷
 Cold Start⁸ <45 seconds
 Warm Start⁹ <30 seconds
 Signal Re-acquisition < 2 seconds
 Velocity Accuracy^{3,4}
 Horizontal 0.007 m/sec
 Vertical 0.020 m/sec
 Acceleration 11 g
 Maximum Operating Limits¹⁰
 Velocity 515 m/sec
 Altitude 18,000 m

PHYSICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Size 261 mm x 140 mm x 55 mm
 Power 9 V DC to 28 V DC
 Maximum 4.1 W
 Weight 1.6 kg
 Connectors
 I/O D-sub DE9 and DA26
 Antenna TNC (Female)
 Antenna LNA Power Output
 Voltage 5 V DC

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS¹¹

Temperature
 Operating -40 °C to +70 °C
 Storage -55 °C to +85 °C
 Vibration MIL810F, tailored
 Random 6.2 gRMS operating
 Random 8 gRMS survival
 Mechanical shock MIL810D
 ±40 g operating
 ±75 g survival
 IP Rating IP67

ORDERING INFORMATION

Enclosure Trimble BX982 GNSS receiver enclosure available in a variety of configurations from L1 DGPS upwards

1 Trimble BX982 is available in a variety of software configurations. Specifications shown reflect full capability.
 2 Developed under a license of the European Union and the European Space Agency.
 3 May be affected by atmospheric conditions, signal multipath, satellite geometry and placement of antennas. Initialization reliability is continuously monitored to ensure highest quality.
 4 1 sigma level, when using Trimble Zephyr™ 2 antennas.
 5 At maximum output rate.
 6 GPS only and depends on SBAS System performance. FAA WAAS accuracy specifications are <5 m 3DRMS.
 7 Typical observed values.
 8 No previous satellite (ephemerides / almanac) or position (approximate position or time) information.
 9 Ephemerides and last used position known.
 10 As required by the U.S. Department of Commerce to comply with export licensing restrictions.
 11 Dependent on appropriate mounting/enclosure design.
 12 Input only network correction.
 13 There is no public GLONASS L3 CDMA ICD. The current capability in the receivers is based on publicly available information. As such, Trimble cannot guarantee that these receivers will be fully compatible.

Specifications subject to change without notice. Specifications subject to change without notice.

© 2014, Trimble Navigation Limited. All rights reserved. Trimble and the Globe & Triangle logo are trademarks of Trimble Navigation Limited, registered in the United States and in other countries. Maxwell is a trademark of Trimble Navigation Limited. All other trademarks are the property of their respective owners. 11/2014

AMERICAS
 TRIMBLE NAVIGATION LIMITED
 Integrated Technologies
 510 DeGuigne Drive
 Sunnyvale, CA 94085 USA
 +1-408-481-8000 Phone
 Email: americasales-intech@trimble.com

EUROPE & MIDDLE EAST
 TRIMBLE NAVIGATION LIMITED
 Integrated Technologies
 Germany
 +49 (6142) 2100-348 Phone
 France
 +33 2 28 09 3800 Phone
 Email: emeasales-intech@trimble.com

CHINA
 TRIMBLE NAVIGATION LIMITED
 Integrated Technologies
 Email: chinasales-intech@trimble.com

ASIA - PACIFIC
 TRIMBLE NAVIGATION LIMITED
 Integrated Technologies
 Email: asiasales-intech@trimble.com

RUSSIA
 TRIMBLE NAVIGATION LIMITED
 Integrated Technologies
 +49 (6142) 2100-348 Phone
 Email: rusasales-intech@trimble.com

Bullet DB – GPS L1 and L2 Antenna

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Operating Temperature.....-40°C to +90°C
Storage Temperature.....-40°C to +90°C
Vibration..... 10 – 200 Hz Log sweep
3g (Sweep time 30 minutes) 3 axes
Shock.....50g vertical, 30g all axes
Humidity Soak.....+60°C @ 95% RH, 96 hours
Corrosion Salt Resistant.....5% Salt spray tested, 96 hours

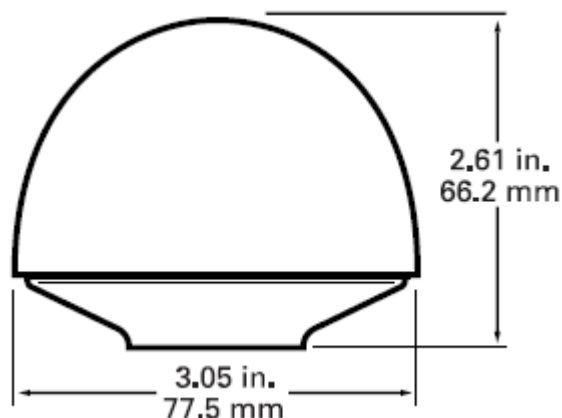
PHYSICAL CHARACTERISTICS – 3.3V & 5V DC ANTENNAS

Dimensions.....3.05" D x 2.61" H (77.5mm x 66.2mm)
Weight.....7.0oz (200grams)
Enclosure.....Off-white plastic
Connector.....F-type & TNC (5V) – TNC (3.3V only)
Mounting.....1" – 14" thread or ¾" pipe thread

TECHNICAL / PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Feature	3.3V	5.0V
Prime Power	3.3V DV (±10%)	5.0V DV (±10%)
Power Consumption	<20mA	<35mA
Gain	32dB @ 25°C	36dB ± 3dB
Output Impedance	50Ω	50Ω
Frequency	L1 1575.42 ± 3MHz L2 1227.60 ± 3MHz	L1 1575.42 ± 3MHz L2 1227.60 ± 3MHz
Polarization	RHCP	RHCP
VSWR	2.0 maximum	2.0 maximum
Axial ratio	<3dB	<3dB
Noise	3.3dB max (25°C ± 5°C)	3.3dB max (25°C ± 5°C)
Bandwidth (10dB RL)	L1: 30MHz (min) L2: 15MHz (min)	L1: 30MHz (min) L2: 15MHz (min)
Out of Band rejection	fo=1575.42 MHz fo ±50 MHz: 30 dB min fo ±100MHz: 40dB min fo=1227.60 MHz fo ±50 MHz: 30 dB min fo ±100MHz: 40dB min	fo=1575.42 MHz fo ±50 MHz: 30 dB min fo ±100MHz: 40dB min fo=1227.60 MHz fo ±50 MHz: 30 dB min fo ±100MHz: 40dB min
Blocking 1dB Compression Point	100MHz to 1.5GHz >+15dBm 1.5GHz to 1.575GHz Linear decrease from +15dBm to -40dBm over frequency range 1.575GHz to 1.65GHz Linear increase from - 40dBm to +15dBm over frequency range 1.65GHz to 3GHz >+15dBm	
Azimuth coverage	360° (omni-directional)	360° (omni-directional)
Elevation coverage	0°-90° elevation (hemispherical)	0°-90° elevation (hemispherical)

MECHANICAL



CONNECTORS



GENERAL INFORMATION & ACCESSORIES

Please go to www.trimble.com/timing for the latest documentation and tools, part numbers and ordering information.

Visit www.trimble.com/timing for part numbers and information about where to buy.

Parts of the product are patent protected.

Trimble has relied on representations made by its suppliers in certifying this product as RoHS-II compliant.

Specifications subject to change without notice.

Trimble Navigation Limited is not responsible for the operation or failure of operation of GPS satellites or the availability of GPS satellite signal.

NORTH AMERICA

Trimble Navigation Limited
Corporate Headquarters
935 Stewart Drive
Sunnyvale, CA 94085
Phone: +1 703 237 7400
timing@trimble.com

EUROPE

Trimble Navigation Europe
Phone: +4670-544-1020

KOREA

Trimble Export Ltd. Korea
Phone: +82-2-555-5361

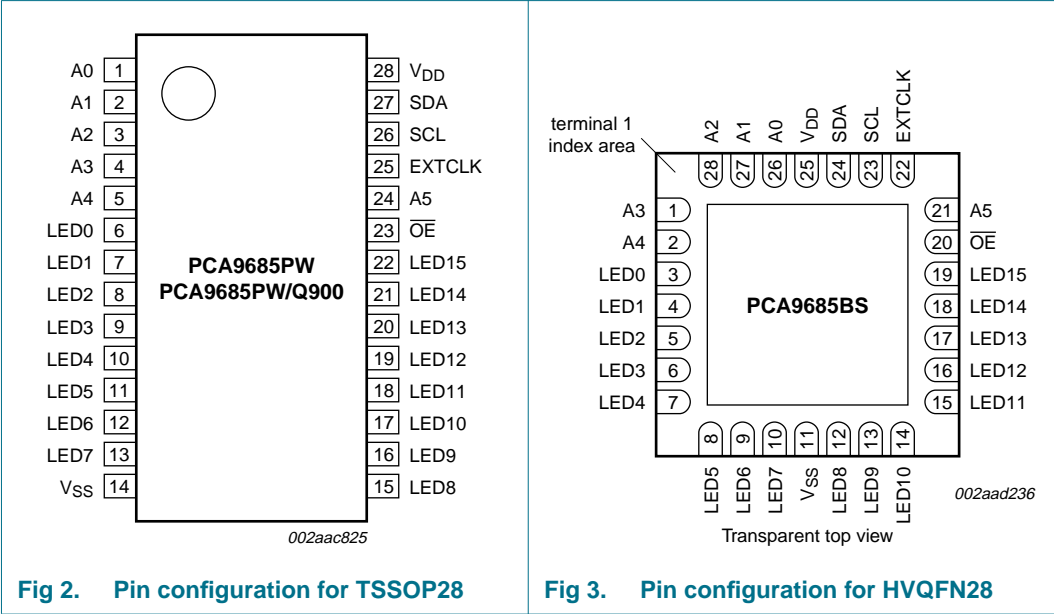
CHINA

Trimble Navigation Ltd. China
Phone: +86-10-8857-7575



6. Pinning information

6.1 Pinning



6.2 Pin description

Table 2. Pin description

Symbol	Pin		Type	Description
	TSSOP28	HVQFN28		
A0	1	26	I	address input 0
A1	2	27	I	address input 1
A2	3	28	I	address input 2
A3	4	1	I	address input 3
A4	5	2	I	address input 4
LED0	6	3	O	LED driver 0
LED1	7	4	O	LED driver 1
LED2	8	5	O	LED driver 2
LED3	9	6	O	LED driver 3
LED4	10	7	O	LED driver 4
LED5	11	8	O	LED driver 5
LED6	12	9	O	LED driver 6
LED7	13	10	O	LED driver 7
V _{SS}	14	11 ^[1]	power supply	supply ground
LED8	15	12	O	LED driver 8
LED9	16	13	O	LED driver 9
LED10	17	14	O	LED driver 10
LED11	18	15	O	LED driver 11



September 2014

LM78XX / LM78XXA

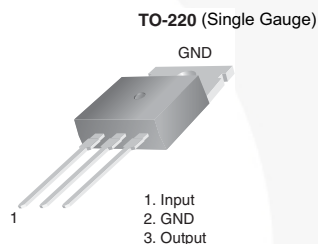
3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator

Features

- Output Current up to 1 A
- Output Voltages: 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24 V
- Thermal Overload Protection
- Short-Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

Description

The LM78XX series of three-terminal positive regulators is available in the TO-220 package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down, and safe operating area protection. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1 A output current. Although designed primarily as fixed-voltage regulators, these devices can be used with external components for adjustable voltages and currents.



Ordering Information⁽¹⁾

Product Number	Output Voltage Tolerance	Package	Operating Temperature	Packing Method
LM7805CT	±4%	TO-220 (Single Gauge)	-40°C to +125°C	Rail
LM7806CT				
LM7808CT				
LM7809CT				
LM7810CT				
LM7812CT				
LM7815CT				
LM7818CT				
LM7824CT				
LM7805ACT	±2%		0°C to +125°C	
LM7809ACT				
LM7810ACT				
LM7812ACT				
LM7815ACT				

Note:

1. Above output voltage tolerance is available at 25°C.

Block Diagram

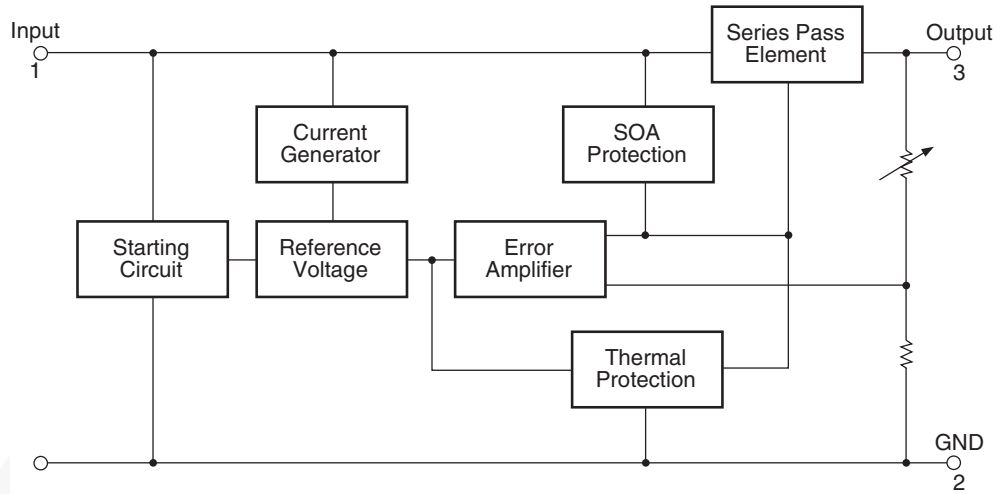


Figure 1. Block Diagram

Absolute Maximum Ratings

Stresses exceeding the absolute maximum ratings may damage the device. The device may not function or be operable above the recommended operating conditions and stressing the parts to these levels is not recommended. In addition, extended exposure to stresses above the recommended operating conditions may affect device reliability. The absolute maximum ratings are stress ratings only. Values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter		Value	Unit
V_I	Input Voltage	$V_O = 5\text{ V to }18\text{ V}$	35	V
		$V_O = 24\text{ V}$	40	
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction-Case (TO-220)		5	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction-Air (TO-220)		65	$^\circ\text{C/W}$
T_{OPR}	Operating Temperature Range	LM78xx	-40 to +125	$^\circ\text{C}$
		LM78xxA	0 to +125	
T_{STG}	Storage Temperature Range		- 65 to +150	$^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics (LM7805)

Refer to the test circuit, $-40^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $V_I = 10\text{ V}$, $C_I = 0.1\text{ }\mu\text{F}$, unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	4.80	5.00	5.20	V
		$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$, $P_O \leq 15\text{ W}$, $V_I = 7\text{ V to }20\text{ V}$	4.75	5.00	5.25	
Regline	Line Regulation ⁽²⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 7\text{ V to }25\text{ V}$	4.0	100.0	mV
			$V_I = 8\text{ V to }12\text{ V}$	1.6	50.0	
Regload	Load Regulation ⁽²⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	9.0	100.0	mV
			$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$	4.0	50.0	
I_Q	Quiescent Current	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$		5	8	mA
ΔI_Q	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$		0.03	0.50	mA
		$V_I = 7\text{ V to }25\text{ V}$		0.30	1.30	
$\Delta V_O / \Delta T$	Output Voltage Drift ⁽³⁾	$I_O = 5\text{ mA}$		-0.8		mV/ $^{\circ}\text{C}$
V_N	Output Noise Voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$		42		μV
RR	Ripple Rejection ⁽³⁾	$f = 120\text{ Hz}$, $V_I = 8\text{ V to }18\text{ V}$	62	73		dB
V_{DROP}	Dropout Voltage	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$, $I_O = 1\text{ A}$		2		V
R_O	Output Resistance ⁽³⁾	$f = 1\text{ kHz}$		15		m Ω
I_{SC}	Short-Circuit Current	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$, $V_I = 35\text{ V}$		230		mA
I_{PK}	Peak Current ⁽³⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$		2.2		A

Notes:

2. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.
3. These parameters, although guaranteed, are not 100% tested in production.

P2N2222A

Amplifier Transistors

NPN Silicon

Features

- These are Pb-Free Devices*

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Value	Unit
Collector – Emitter Voltage	V_{CEO}	40	Vdc
Collector – Base Voltage	V_{CBO}	75	Vdc
Emitter – Base Voltage	V_{EBO}	6.0	Vdc
Collector Current – Continuous	I_C	600	mA dc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625 5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.5 12	W mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

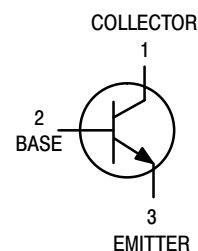
Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C/W}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

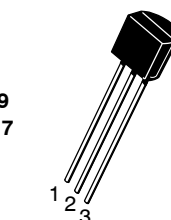


ON Semiconductor®

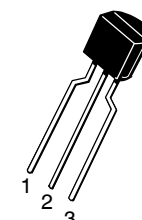
<http://onsemi.com>



TO-92
CASE 29
STYLE 17

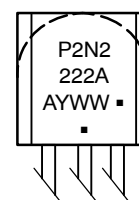


STRAIGHT LEAD
BULK PACK



BENT LEAD
TAPE & REEL
AMMO PACK

MARKING DIAGRAM



A = Assembly Location

Y = Year

WW = Work Week

▪ = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
P2N2222AG	TO-92 (Pb-Free)	5000 Units/Bulk
P2N2222ARL1G	TO-92 (Pb-Free)	2000/Tape & Ammo

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specification Brochure, BRD8011/D.

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

P2N2222A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Collector – Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 0$)	$V_{(BR)CEO}$	40	–	Vdc
Collector – Base Breakdown Voltage ($I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$, $I_E = 0$)	$V_{(BR)CBO}$	75	–	Vdc
Emitter – Base Breakdown Voltage ($I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$, $I_C = 0$)	$V_{(BR)EBO}$	6.0	–	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 60\text{ Vdc}$, $V_{EB(off)} = 3.0\text{ Vdc}$)	I_{CEX}	–	10	nAdc
Collector Cutoff Current ($V_{CB} = 60\text{ Vdc}$, $I_E = 0$) ($V_{CB} = 60\text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $T_A = 150^\circ\text{C}$)	I_{CBO}	– –	0.01 10	μAdc
Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = 3.0\text{ Vdc}$, $I_C = 0$)	I_{EBO}	–	10	nAdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 10\text{ V}$)	I_{CEO}	–	10	nAdc
Base Cutoff Current ($V_{CE} = 60\text{ Vdc}$, $V_{EB(off)} = 3.0\text{ Vdc}$)	I_{BEX}	–	20	nAdc

ON CHARACTERISTICS

DC Current Gain ($I_C = 0.1\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$) ($I_C = 1.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$) ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$) ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $T_A = -55^\circ\text{C}$) ($I_C = 150\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$) (Note 1) ($I_C = 150\text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$) (Note 1) ($I_C = 500\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$) (Note 1)	h_{FE}	35 50 75 35 100 50 40	– – – – 300 – –	–
Collector – Emitter Saturation Voltage (Note 1) ($I_C = 150\text{ mA}$, $I_B = 15\text{ mA}$) ($I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$)	$V_{CE(sat)}$	– –	0.3 1.0	Vdc
Base – Emitter Saturation Voltage (Note 1) ($I_C = 150\text{ mA}$, $I_B = 15\text{ mA}$) ($I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$)	$V_{BE(sat)}$	0.6 –	1.2 2.0	Vdc

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

Current – Gain – Bandwidth Product (Note 2) ($I_C = 20\text{ mA}$, $V_{CE} = 20\text{ Vdc}$, $f = 100\text{ MHz}$)C	f_T	300	–	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 10\text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	C_{obo}	–	8.0	pF
Input Capacitance ($V_{EB} = 0.5\text{ Vdc}$, $I_C = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	C_{ibo}	–	25	pF
Input Impedance ($I_C = 1.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$) ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	h_{ie}	2.0 0.25	8.0 1.25	k Ω
Voltage Feedback Ratio ($I_C = 1.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$) ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	h_{re}	– –	8.0 4.0	$\times 10^{-4}$
Small-Signal Current Gain ($I_C = 1.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$) ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	h_{fe}	50 75	300 375	–
Output Admittance ($I_C = 1.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$) ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	h_{oe}	5.0 25	35 200	μMhos
Collector Base Time Constant ($I_E = 20\text{ mA}$, $V_{CB} = 20\text{ Vdc}$, $f = 31.8\text{ MHz}$)	$r_b'C_c$	–	150	ps
Noise Figure ($I_C = 100\text{ }\mu\text{A}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $R_S = 1.0\text{ k}\Omega$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	N_F	–	4.0	dB

1. Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$.
2. f_T is defined as the frequency at which $|h_{fe}|$ extrapolates to unity.



Números de Motores de Cierre Estilo B

SERIE 344B			CONSUMO DE CORRIENTE (A)**	SERIE 346B Y 356			CONSUMO DE CORRIENTE (A)**		LARGO DE CABLE
MOTOR BEC CON INTERRUPTOR POSITIVO	*MOTOR BEC CON INTERRUPTOR NEGATIVO	MOTOR BE CON INTERRUPTOR	344B	MOTOR BEC CON INTERRUPTOR POSITIVO	*MOTOR BEC CON INTERRUPTOR NEGATIVO	MOTOR BE CON INTERRUPTOR	346B	356	
50515-22CP03	* 50515-22CN03	* 50533-22C03	1,1	50515-25CP03	* 50515-25CN03	* 50533-25C03	1,75	2,2	Cable de 0,3 metros (1,0 pies)
50515-22CP05	* 50515-22CN05	50533-22C05	1,1	50515-25CP05	* 50515-25CN05	50533-25C05	1,75	2,2	Cable de 0,5 metros (1,5 pies)
50515-22CP15	* 50515-22CN15	* 50533-22C15	1,1	50515-25CP15	* 50515-25CN15	* 50533-25C15	1,75	2,2	Cable de 1,5 metros (5 pies)
50515-22CP60	* 50515-22CN60	* 50533-22C60	1,1	50515-25CP60	* 50515-25CN60	* 50533-25C60	1,75	2,2	Cable de 6 metros (20 pies)
50515-22DP	* 50515-22DN	* 50533-22D	1,1	50515-25DP	* 50515-25DN	* 50533-25D	1,75	2,2	Conector Eléctrico DIN

Los artículos marcados con un "*" no se mantienen en existencia.

** El consumo de corriente es un valor nominal a 13,8 VCC y variará dependiendo del uso de la válvula y de los productos químicos usados.

Nota: Los cables DIN se piden por separado.

*Motores BEC con Válvula de Desvío (Normalmente Abierta)

SERIE 344B			CONSUMO DE CORRIENTE (A)**	SERIE 346B Y 356			CONSUMO DE CORRIENTE (A)**		LARGO DE CABLE
MOTOR BEC CON INTERRUPTOR POSITIVO	*MOTOR BEC CON INTERRUPTOR NEGATIVO	MOTOR BE CON INTERRUPTOR	344B	MOTOR BEC CON INTERRUPTOR POSITIVO	*MOTOR BEC CON INTERRUPTOR NEGATIVO	MOTOR BE CON INTERRUPTOR	346B	356	
50994-22CP03	* 50994-22CN03	* 50533-22C03	1,1	50994-25CP03	* 50994-25CN03	* 50533-25C03	1,75	2,2	Cable de 0,3 metros (1,0 pies)
50994-22CP05	* 50994-22CN05	50533-22C05	1,1	50994-25CP05	* 50994-25CN05	50533-25C05	1,75	2,2	Cable de 0,5 metros (1,5 pies)
50994-22CP15	* 50994-22CN15	* 50533-22C15	1,1	50994-25CP15	* 50994-25CN15	* 50533-25C15	1,75	2,2	Cable de 1,5 metros (5 pies)
50994-22CP60	* 50994-22CN60	* 50533-22C60	1,1	50994-25CP60	* 50994-25CN60	* 50533-25C60	1,75	2,2	Cable de 6 metros (20 pies)
50994-22DP	* 50994-22DN	* 50533-22D	1,1	50994-25DP	* 50994-25DN	* 50533-25D	1,75	2,2	Conector Eléctrico DIN

Los artículos marcados con un "*" no se mantienen en existencia.

** El consumo de corriente es un valor nominal a 13,8 VCC y variará dependiendo del uso de la válvula y de los productos químicos usados.

Nota: Los cables DIN se piden por separado.

Motores Reguladores 344B y 346B

VELOCIDAD (RPM)	N° MOTOR R Y RL	N° MOTOR PR	CONSUMO DE CORRIENTE (A)**		LARGO DE CABLE
			AA344B	AA346B	
1	* 50516-01C03	* 50996-01C03	0,10	0,12	Cable de 0,3 metros (1,0 pies)
1	* 50516-01C05	* 50996-01C05	0,10	0,12	Cable de 0,5 metros (1,5 pies)
1	* 50516-01C15	* 50996-01C15	0,10	0,12	Cable de 1,5 metros (5 pies)
1	* 50516-01C60	* 50996-01C60	0,10	0,12	Cable de 6 metros (20 pies)
1	* 50516-01D	* 50996-01D	0,10	0,12	Conector Eléctrico DIN
3	* 50516-03C03	* 50996-03C03	0,15	0,20	Cable de 0,3 metros (1,0 pies)
3	* 50516-03C05	* 50996-03C05	0,15	0,20	Cable de 0,5 metros (1,5 pies)
3	* 50516-03C15	* 50996-03C15	0,15	0,20	Cable de 1,5 metros (5 pies)
3	* 50516-03C60	* 50996-03C60	0,15	0,20	Cable de 6 metros (20 pies)
3	* 50516-03D	* 50996-03D	0,15	0,20	Conector Eléctrico DIN
6	* 50516-06C03	* 50996-06C03	0,43	0,50	Cable de 0,3 metros (1,0 pies)
6	* 50516-06C05	* 50996-06C05	0,43	0,50	Cable de 0,5 metros (1,5 pies)
6	* 50516-06C15	* 50996-06C15	0,43	0,50	Cable de 1,5 metros (5 pies)
6	* 50516-06C60	* 50996-06C60	0,43	0,50	Cable de 6 metros (20 pies)
6	* 50516-06D	* 50996-06D	0,43	0,50	Conector Eléctrico DIN

Los artículos marcados con un "*" no se mantienen en existencia.

** El consumo de corriente es un valor nominal a 13,8 VCC y variará dependiendo del uso de la válvula y de los productos químicos usados.

Nota: Los cables DIN se piden por separado. Consulte la página 66 para las opciones de cables DIN.

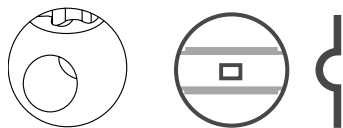


Válvulas Reguladoras de Presión Eléctricas DirectoValve®

La válvula reguladora correcta mejorará el funcionamiento de un pulverizador, especialmente si tiene regulador de caudal automático. Mientras los sistemas electrónicos avanzados proporcionan ventajas y control, la válvula reguladora correcta ayuda al sistema a responder rápidamente a cambios y funciones en un amplio rango de caudales de aplicación. La selección de la válvula correcta implica determinar la capacidad máxima requerida, el rango de caudales de aplicación y la velocidad correcta del motor.

Capacidad del Sistema

Los requisitos de sistema de una válvula reguladora dependerán de la cantidad de aplicación y de la capacidad de bombeo. Adicionalmente, la válvula reguladora se puede utilizar en modo de desvío o reducción. En el modo de reducción, el caudal que pasa por la válvula se aplicará a través de las boquillas. En el modo de desvío, el caudal en exceso de la bomba se hace recircular. Una válvula que funciona bien en todo el espectro de caudales tiene la mejor probabilidad de funcionar en todas las situaciones.



Válvula Tipo R Válvula de Mariposa

Válvulas Tipo R y Mariposa

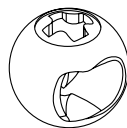
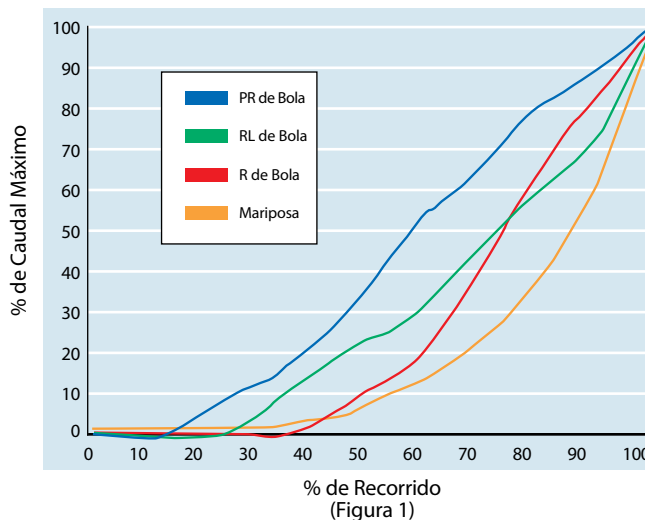
Como se muestra en el gráfico, la válvula de mariposa tiene la curva de caudal menos lineal para el 1/3 (30°) final del recorrido, lo cual conlleva a un aumento del 75% del caudal a través de la válvula. La curva de la bola "R" de 2 vías no es tan pronunciada, y el caudal que pasa por la válvula aumenta en 60% en los últimos 30° de recorrido. La bola "R", sin embargo, tiene la desventaja adicional de no permitir un caudal significativo durante el primer 1/3 de su rotación. Puesto que un pequeño cambio de rotación provoca un cambio significativo cuando se utilizan estas válvulas, presenta un desafío intentar regular caudales voluminosos cuando la válvula está entre dos tercios y totalmente abierta.

Tipos de Válvulas Reguladoras

Las formas especiales de bola hacen que las válvulas reguladoras sean más sensibles y capaces de funcionar con caudales de aplicación tanto altos como bajos. La mayoría de los pulverizadores agrícolas utilizan ya sea una válvula de bola de 2 vías o una válvula de mariposa para fines de regulación.

Cuando se considera dimensionar una válvula reguladora, lo primero es entender la curva del caudal de la válvula para determinar con qué eficiencia regulará. La Figura 1 muestra las curvas de caudal típicas de las válvulas reguladoras DirectoValve®. Esto ayudará a decidir el tipo de válvula que se debe utilizar.

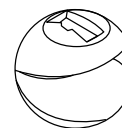
Curvas de Caudal de Válvulas Reguladoras



Válvula RL

Válvula RL

Spraying Systems Co.® ha desarrollado una bola especial que permite que la válvula empiece a regular más temprano, extendiendo así el rango de regulación. Esta válvula de bola especial también aumenta el caudal y la característica lineal de la válvula durante los primeros 3/4 del ciclo de la válvula. El caudal de la válvula se inicia 10° antes que una bola regular tipo R y aumenta el caudal de la bola RL durante el primer 70% del recorrido (Figura 1). La capacidad máxima es aproximadamente 10% menos que una válvula tipo R.



Válvula PR

Válvula PR

La válvula PR utiliza un cuerpo de válvula de 3 vías y una bola con una cuña removida. La combinación de esta bola y un motor que gira más allá de los 90° estándar resulta en una válvula con una curva de caudal casi lineal. La versión 2PR tiene una salida taponada. La versión 3PR permite que el caudal desviado retorne al depósito.

Como se indica en la Figura 1, el porcentaje de caudal aumenta aproximadamente en función de la cantidad de recorrido de la bola, lo cual evita el cambio rápido que se observa con las válvulas de bola estándar y las válvulas de mariposa.

Válvulas Reguladoras de Bola

* No disponible en acero inoxidable.

NÚMERO DE MODELO	PRESIÓN MÁXIMA	FLUJO CON CAÍDA DE PRESIÓN DE 0,34 bar (5 PSI)	FLUJO CON CAÍDA DE PRESIÓN DE 0,69 bar (10 PSI)
344BR-2	20 bar (300 PSI)	121 l/min (32 GPM)	170 l/min (45 GPM)
344BR-3	20 bar (300 PSI)	91 l/min (24 GPM)	129 l/min (34 GPM)
344BRL-2	20 bar (300 PSI)	102 l/min (27 GPM)	144 l/min (38 GPM)
* 344BPR-2	20 bar (300 PSI)	45 l/min (12 GPM)	64 l/min (17 GPM)
* 344BPR-3	20 bar (300 PSI)	45 l/min (12 GPM)	64 l/min (17 GPM)
346BR-2	10 bar (150 PSI)	379 l/min (100 GPM)	534 l/min (141 GPM)
346BR-3	10 bar (150 PSI)	242 l/min (64 GPM)	344 l/min (91 GPM)
* 346BPR-2	10 bar (150 PSI)	200 l/min (53 GPM)	284 l/min (75 GPM)
* 346BPR-3	10 bar (150 PSI)	200 l/min (53 GPM)	284 l/min (75 GPM)



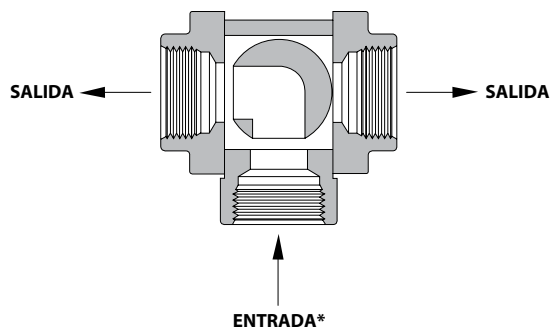
Válvulas de Bola Reguladoras de Presión 344B y 346B

Las válvulas reguladoras eléctricas de la serie 340 están diseñadas para producir la regulación de caudal lineal y de cierre en aplicaciones agrícolas. Los dos modelos están disponibles en varios estilos y velocidades del motor para adaptarse a distintos tipos de aplicaciones.

Características:

- Disponibles en versiones de 2 y 3 vías.
- Disponibles con motor de 1, 3 ó 6 rpm. Nota: En las versiones PR el tiempo de ciclo es el doble que en la versión R o RL.
- Un conductor de dos alambres provee una instalación fácil en sistemas de 12 VCC.
- Bajo consumo de corriente, menos de 1 A.
- Se ofrecen con una variedad de conexiones de entrada/salida. Consulte las páginas 102–104 para más información y otras opciones.
- Las partes que entran en contacto con el líquido son fabricadas de nylon, polipropileno, acero inoxidable, Teflon® y Viton®.
- Consulte las páginas 66–68 para más información sobre los motores estilo B.

TRAYECTORIA DE FLUJO PARA VÁLVULAS DE BOLA REGULADORAS DE 3 VÍAS (VISTA DESDE ARRIBA)



*NOTA: SE DEBE USAR LA CONEXIÓN LATERAL COMO ENTRADA.



Serie R y RL



Serie 344 BPR



Serie 346 R



Serie 346 BPR

Válvulas de Mariposa

Válvula de mariposa reguladora eléctrica de control a distancia AA(B)244C-3/4

La válvula reguladora eléctrica de control a distancia AA244C ha sido diseñada específicamente para proporcionar un control de la presión a distancia en aplicaciones agrícolas mediante el uso de las válvulas solenoides de cierre DirectoValve AA144A o AA145.

Características:

- Flujo sin restricción cuando está totalmente abierta –pérdida de presión de 0,34 bar (5 PSI) para un caudal de 107 l/min (28,4 GPM).
- Caudal de desviación: 7,5 l/min (2 GPM) a 0,7 bar (10 PSI).

- Funciona en sistemas de 12 VDC y puede ser controlado por medio de un interruptor bipolar centrado por resorte.
- Presión máxima de trabajo de 7 bar (100 PSI).
- Conductor de dos alambres para uso en sistema de 12 VCC.
- Conexiones de 3/4 pulg. (H) NPT o BSPT.
- Instalación fácil (fluye en cualquier sentido).
- Buena resistencia a la corrosión.
- Bajo consumo de corriente (0,10 A).
- Tiempo de respuesta: 20 segundos.



Cómo hacer un pedido:

Especifique el número de modelo.

Ejemplo: AA(B)244C-3/4

(B) = BSPT

H BRIDGE DRIVER

■ GENERAL DESCRIPTION

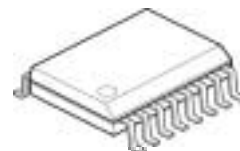
The NJM2675 is a general-purpose 60V single H-bridge drive IC. It consists of a H-bridge, a thermal shut down circuit and its alarm output. The alarm output can detect application problems and the system reliability will be significantly improved if monitored by Microprocessor.

Therefore, it is suitable for DC motor application driven by Microprocessor.

■ PACKAGE OUTLINE



NJM2675D

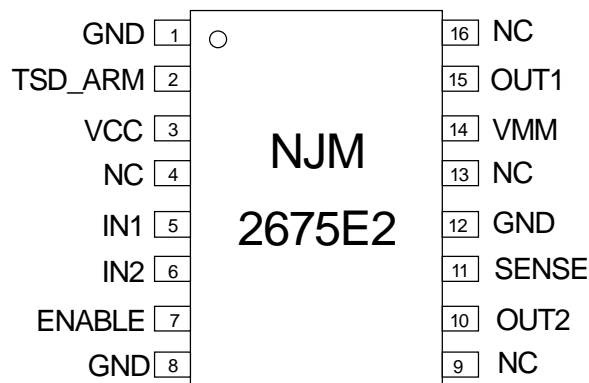
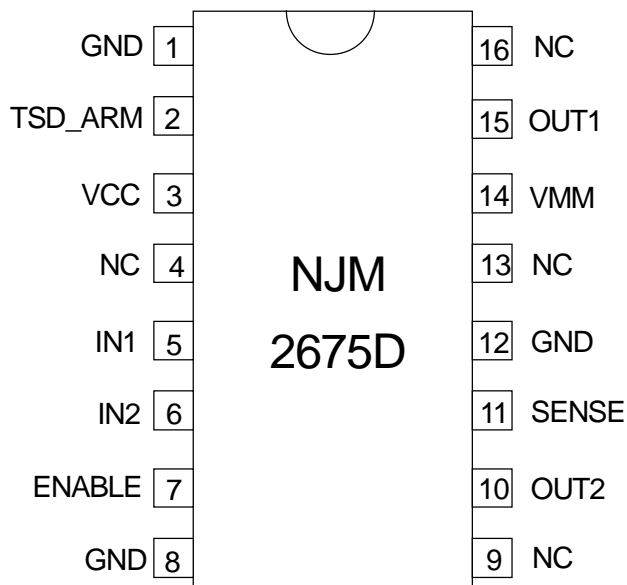


NJM2675E2

■ FEATURE

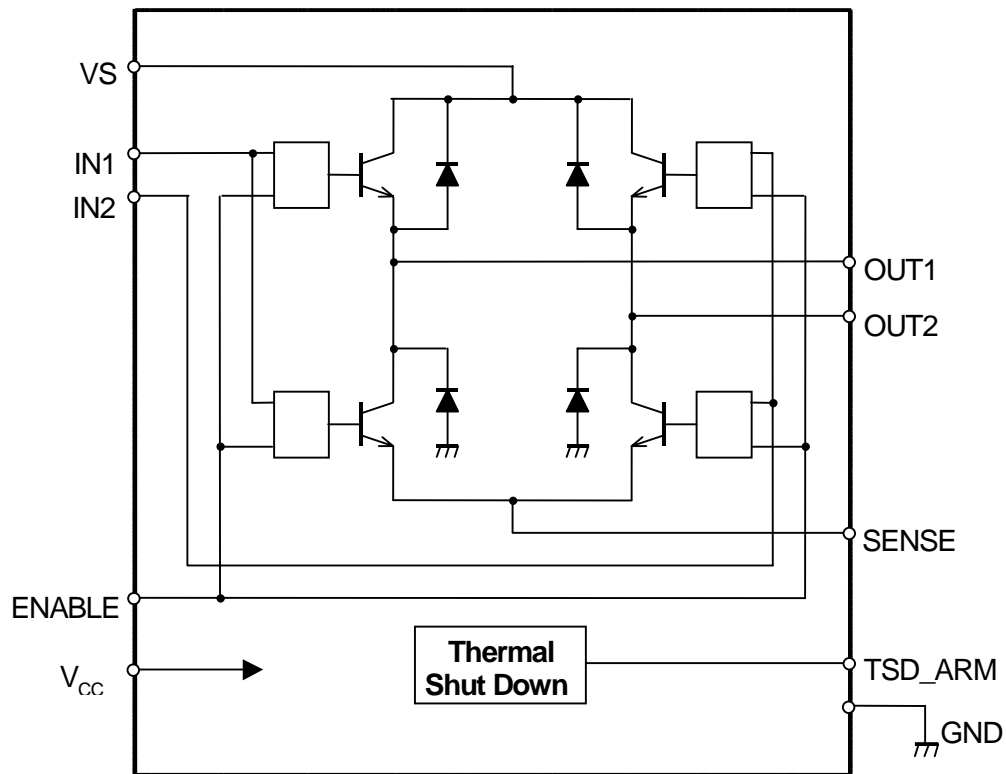
- Wide Voltage Range 4V to 55V
- Wide Range of Current Control 5 to 1200mA
- Thermal Shut Down Circuit (with Alarm Output)
- Dead Band Protector
- Package Outline DIP16 / EMP16

■ PIN CONNECTION



NJM2675

■ BLOCK DIAGRAM



■ PIN DESCRIPTION

Pin No.	Symbol	Description
1	GND	Ground (This terminal has to be connected to pin8 and pin12)
2	TSD_ARM	Thermal shut down alarm output
3	VCC	Logic supply voltage
4	NC	No connect
5	IN1	Logic control signal input
6	IN2	Logic control signal input
7	ENABLE	Output ON/OFF control
8	GND	Ground (This terminal has to be connected to pin1 and pin12.)
9	NC	No connect
10	OUT2	Motor output 2
11	SENSE	Current cense
12	GND	Ground (This terminal has to be connected to pin8 and pin12.)
13	NC	No connect
14	VMM	Motor supply voltage
15	OUT1	Motor output
16	NC	No connect

■ ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)

PARAMETER	SYMBOL	RATINGS	UNIT
Maximum Supply Voltage	V_{MM}	60	V
Logic Supply Voltage	V_{CC}	7	V
Input Voltage Range	V_{IN}	-0.3 to 7	V
Output Current	I_{OUT}	1.5	A
Power dissipation (DIP package)	P_D	1.2	W
Power dissipation (EMP package)	P_D	1.3 (Note1)	W
Operating Junction Temperature	T_{opr}	-40 ~ 85	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-55 ~ 150	°C

Note1 Specified board : EIA / JEDEC specification (76. 2×114.3×h1.6mm, 2-layer, FR4)

■ RECOMENENDO OPERATING CONDITIONS








PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Supply Voltage	V_{MM}		4	-	55	V
Logic Voltage Range	V_{CC}		4.75	5.00	5.25	V
Maximum Output Current	I_{OUT}		-	-	1.2	A
Operating junction temperature	T_J		-20	-	125	°C

■ ELECTRICAL CHARACTERISTICS

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
GENERAL						
Quiescent current	I_{cc}	Enable=H, IN1=L, IN2=H	-	20	-	mA
Thermal shutdown	T_{tsd}		-	170	-	°C
Off-State leak current	I_{tsd_LEAK}	TSD ARM=5V	-	-	50	μA
Thermal alarm output saturation	V_{tsd}	$I_o=5mA$	-	0.5	0.7	V
Dead time protection	T_d		-	1	-	μs
LOGIC						
Input LOW voltage	V_{iL}		-	-	0.6	V
Input HIGH voltage	V_{iH}		2	-	-	V
Input HIGH current	I_{iH}	$V_i=2.4V$	-	-	20	μA
Input LOW current	I_{iL}	$V_i=0.4V$	-0.4	-	-	mA
OUTPUT						
Upper transistor saturation	V_{OU1}	$I_o=1000mA$	-	1.3	1.5	V
	V_{OU2}	$I_o=1300mA$	-	1.5	1.8	V
Lower transistor saturation	V_{OL1}	$I_o=1000mA$	-	0.5	0.8	V
	V_{OL2}	$I_o=1300mA$	-	0.8	1.3	V
Upper diode forward	V_{fU1}	$I_o=1000mA$	-	1.3	1.6	V
	V_{fU2}	$I_o=1300mA$	-	1.6	1.9	V
Lower diode forward	V_{fL1}	$I_o=1000mA$	-	1.3	1.6	V
	V_{fL2}	$I_o=1300mA$	-	1.6	1.9	V
Output leakage current	I_{O_LEAK}	$V_{MM}=50V$	-	-	1	mA
Upper diode recovery time	T_{rrU}		-	250	-	ns
Lower diode recovery time	T_{rrL}		-	250	-	ns

COMBO-JET® Tip/Caps, Strainers, Pre-orifices and Flanged Tips

For detailed information, see Tip/Cap Brochure (Pub. #10200-XX)

 COMBO-JET® ER Tip/Cap Part# MSRP	 COMBO-JET® SR Tip/Cap (P-O #)1 Part# MSRP	 COMBO-JET® MR Tip/Cap (P-O #)1 Part# MSRP	 COMBO-JET® DR Tip/Cap (P-O #)1 Part# MSRP	 Flanged ER Tip Part# MSRP	 Pre-orifice² (P-O) Part# MSRP	Pre-orifice & Tip/Cap Color	Use TIP WIZARD to help pick your tips! Available on the wilger.net website or smartphone app												 TIPWIZARD	
							www.wilger.net													
							For complete application charts see Tip/Cap literature													
Liquid Press		Flow per Tip		Miles per hour																
PSI		US GPM		5.0 7.5 10.0 15.0 20.0																
ER80-08 40270-08 \$7.73	SR80-08 (R10) 40288-08 \$15.26	MR80-08 (R08) 40290-08 \$15.26	DR80-08 (R08) 40280-08 \$15.26	ER80-08 40170-08 \$7.73	R08 40285-08 40285-08S \$5.26	08 WHITE	20	0.57	33.6	22.4	16.8	11.2	8.4							
							25	0.63	37.5	25.0	18.8	12.5	9.4							
							30	0.69	41.1	27.4	20.6	13.7	10.3							
							40	0.80	47.5	31.7	23.7	15.8	11.9							
ER110-08 40281-08 \$7.73	SR110-08 (R08S) 40287-08 \$15.26	MR110-08 (R08S) 40291-08 \$15.26	DR110-08 (R08S) 40286-08 \$15.26	ER110-08 40169-08 \$7.73			50	0.89	53.1	35.4	26.6	17.7	13.3							
							60	0.98	58.2	38.8	29.1	19.4	14.5							
ER80-10 40270-10 \$10.32	SR80-10 (R125) 40288-10 \$15.26	MR80-10 (R10) 40290-10 \$15.26	DR80-10 (R10) 40280-10 \$15.26	-	R10 40285-10 40285-10S \$5.26	10 LIGHT BLUE	20	0.71	42.0	28.0	21.0	14.0	10.5							
							25	0.79	46.9	31.3	23.5	15.6	11.7							
							30	0.87	51.4	34.3	25.7	17.1	12.9							
							40	1.00	59.4	39.6	29.7	19.8	14.8							
ER110-10 40281-10 \$10.32	SR110-10 (R10S) 40287-10 \$15.26	MR110-10 (R10S) 40291-10 \$15.26	DR110-10 (R10) 40286-10 \$15.26	-			50	1.12	66.4	44.3	33.2	22.1	16.6							
							60	1.22	72.7	48.5	36.4	24.2	18.2							
ER80-125 40270-125 \$10.32	SR80-125 (R20) 40288-125 \$15.26	MR80-125 (R125) 40290-125 \$15.26	DR80-125 (R125) 40280-125 \$15.26	-	R125 40285-125 40285-13S \$5.26	12.5 TEAL	20	0.88	52.5	35.0	26.2	17.5	13.1							
							25	0.99	58.7	39.1	29.3	19.6	14.7							
							30	1.08	64.3	42.8	32.1	21.4	16.1							
							40	1.25	74.2	49.5	37.1	24.7	18.6							
ER110-125 40281-125 \$10.32	SR110-125 (R125S) 40287-125 \$15.26	MR110-125 (R125) 40291-125 \$15.26	DR110-125 (R125) 40286-125 \$15.26	-			50	1.40	83.0	55.3	41.5	27.7	20.7							
							60	1.53	90.9	60.6	45.4	30.3	22.7							
ER80-15 40270-15 \$10.32	SR80-15 (R20) 40288-15 \$15.26	MR80-15 (R15) 40290-15 \$15.26	DR80-15 (R15) 40280-15 \$15.26	-	R15 40285-15 \$5.26	15 LIGHT GREEN	20	1.06	63.0	42.0	31.5	21.0	15.7							
							25	1.19	70.4	46.9	35.2	23.5	17.6							
							30	1.30	77.1	51.4	38.6	25.7	19.3							
							40	1.50	89.1	59.4	44.5	29.7	22.3							
ER110-15 40281-15 \$10.32	SR110-15 (R20) 40287-15 \$15.26	MR110-15 (R15) 40291-15 \$15.26	DR110-15 (R15) 40286-15 \$15.26	-			50	1.68	99.6	66.4	49.8	33.2	24.9							
							60	1.84	109.1	72.7	54.5	36.4	27.3							
ER80-20 40270-20 \$10.32	SR80-20 (R25) 40288-20 \$15.26	MR80-20 (R20) 40290-20 \$15.26	DR80-20 (R20) 40280-20 \$15.26	-	R20 40285-20 \$5.26	20 TAN	20	1.41	84.0	56.0	42.0	28.0	21.0							
							25	1.58	93.9	62.6	46.9	31.3	23.5							
							30	1.73	102.8	68.6	51.4	34.3	25.7							
							40	2.00	118.7	79.2	59.4	39.6	29.7							
ER110-20 40281-20 \$10.32	SR110-20 (R25) 40287-20 \$15.26	MR110-20 (R20) 40291-20 \$15.26	-	-			50	2.24	132.8	88.5	66.4	44.3	33.2							
							60	2.45	145.4	96.9	72.7	48.5	36.4							
ER80-25 40270-25 \$10.32	SR80-25 (R40) 40288-25 \$15.26	MR80-25 (R25) 40290-25 \$15.26	DR80-25 (R25) 40280-25 \$15.26	-	R25 40285-25 \$5.26	25 BLACK	20	1.77	105.0	70.0	52.5	35.0	26.2							
							25	1.98	117.3	78.2	58.7	39.1	29.3							
							30	2.17	128.5	85.7	64.3	42.8	32.1							
							40	2.50	148.4	98.9	74.2	49.5	37.1							
ER110-25 40281-25 \$10.32	SR110-25 (R40) 40287-25 \$15.26	-	-	-			50	2.80	165.9	110.6	83.0	55.3	41.5							
							60	3.06	181.8	121.2	90.9	60.6	45.4							
ER80-30 40270-30 \$10.32	SR80-30 (R40) 40288-30 \$15.26	MR80-30 (R30) 40290-30 \$15.26	DR80-30 (R30) 40280-30 \$15.26	-	R30 40285-30 \$5.26	30 BLACK	20	2.12	125.9	84.0	63.0	42.0	31.5							
							25	2.37	140.8	93.9	70.4	46.9	35.2							
							30	2.60	154.2	102.8	77.1	51.4	38.6							
							40	3.00	178.1	118.7	89.1	59.4	44.5							
ER110-30 40281-30 \$10.32	-	-	-	-			50	3.35	199.1	132.8	99.6	66.4	49.8							
							60	3.67	218.1	145.4	109.1	72.7	54.5							
ER80-40 40270-40 \$10.32	SR80-40 (R50) 40288-40 \$15.26	MR80-40 (R40) 40290-40 \$15.26	-	-	R40 40285-40 \$5.26	40 BLACK	20	2.83	167.9	111.9	84.0	56.0	42.0							
							25	3.16	187.7	125.2	93.9	62.6	46.9							
							30	3.46	205.7	137.1	102.8	68.6	51.4							
							40	4.00	237.5	158.3	118.7	79.2	59.4							
-	-	-	-	-			50	4.47	265.5	177.0	132.8	88.5	66.4							
							60	4.90	290.8	193.9	145.4	96.9	72.7							
ER80-50 40270-50 \$10.32	SR80-50 (R50) 40288-50 \$15.26	MR80-50 (R50) 40290-50 \$15.25	-	-	R50 40285-50 \$5.26	50 BLACK	20	3.54	209.9	139.9	105.0	70.0	52.5							
							25	3.95	234.7	156.5	117.3	78.2	58.7							
							30	4.33	257.1	171.4	128.5	85.7	64.3							
							40	5.00	296.8	197.9	148.4	98.9	74.2							
-	-	-	-	-			50	5.59	331.9	221.3	165.9	110.6	83.0							
							60	6.12	363.6	242.4	181.8	121.2	90.9							
ER80-60 40270-60 \$10.32	-	-	-	-	-	60 BLACK	20	4.24	251.9	167.9	125.9	84.0	63.0							
							25	4.74	281.6	187.7	140.8	93.9	70.4							
							30	5.20	308.5	205.7	154.2	102.8	77.1							
							40	6.00	356.2	237.5	178.1	118.7	89.1							
-	-	-	-	-			50	6.71	398.3	265.5	199.1	132.8	99.6							
							60	7.35	436.3	290.8	218.1	145.4	109.1							

NOTE: ¹SR, MR, & DR tip/caps include a pre-orifice. MR & DR pre-orifice color is the same as the cap. SR pre-orifice color may differ from the cap.

²Pre-Orifices can be purchased separately for use with Wilger radiallock caps for liquid applications or other metering situations.

³Buna-N O-rings are standard. VITON® options available: change part# to XXXX-VXXX. (i.e. [Buna-N] 40287-015 [VITON®] 40287-V015). Contact Wilger for VITON® pricing.

⁴Above are standard 80° & 110° spray tips. For other spray tip angles and other types of tips, contact Wilger.

COMBO-JET® Radiallock Caps, Accessories & Adapters

For detailed information, see Tip/Cap Brochure (Pub. #10201-00)

COMBO-JET® & SQUARE LUG CAP ADAPTERS

For VITON® O-ring options, contact Wilger.

40200-00	SQ LUG TO COMBO-JET ADAPTER	\$1.84
40202-00	HARDI TO COMBO-JET ADAPTER	\$2.27
40203-00	COMBO-JET TO SQ LUG ADAPTER	\$2.27
40204-00	SQ LUG TO COMBO-JET ADAPTER - LOCK RING STYLE	\$2.27

Different adapters let you use COMBO-JET® Tip/Caps on square lug nozzle bodies or square lug caps on COMBO-JET® nozzle bodies.



RADIALLOCK CAPS (for use on COMBO-JET® outlets)

(Different color caps available as non-stocked item. Black is standard. Order item number XXXX-01 for Red; -02 for White; -03 for Green; -04 for Yellow)

Radiallock Slotted Caps (caps require 40160-00 seal)

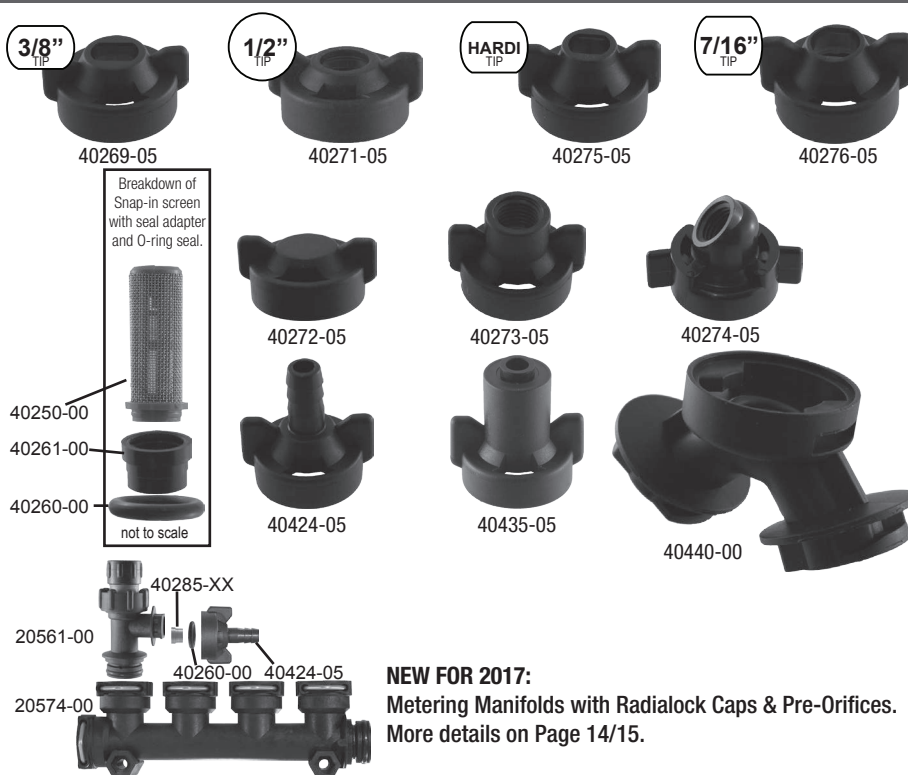
40271-05	RADIALLOCK CAP - ROUND	\$0.97
40275-05	RADIALLOCK CAP - HARDI	\$0.97
40276-05	RADIALLOCK CAP - WIDE	\$0.97
40279-05	RADIALLOCK CAP - HIGH FLOW SLOT	\$0.97
40160-00	NOZZLE GASKET - UNIVERSAL EPDM	\$0.49

Nozzle Strainers and O-rings for Radiallock Caps

40250-00	NOZZLE STRAINER ASSY - SNAP-IN C/J, 50 MESH	\$1.66
40251-00	NOZZLE STRAINER ASSY - SNAP-IN C/J, 100 MESH	\$1.66
40260-00	NOZZLE SEAL - COMBO-JET 13 mm X 3 mm	\$0.22
40260-V0	NOZZLE SEAL - COMBO-JET 13 mm X 3 mm - VITON®	\$1.89
40261-00	SEAL/STRAINER ADAPTER	\$0.36
40285-XX	PRE-ORIFICE (SEE PAGE 4/5)	\$5.26

Hose Barb, Threaded and Other Radiallock Caps

Description	ASSEMBLY (comes with seal adapter, if appl.)		
	BUNA-N	VITON®	CAP ONLY
1/8" NPT	40277-B5 \$2.06	40277-V5 \$3.72	40277-05 \$1.23
1/8" Hosebarb	40420-B5 \$2.49	40420-V5 \$4.16	40420-05 \$1.23
1/4" Female NPT	40273-B5 \$2.49	40273-V5 \$4.16	40273-05 \$1.23
45° 1/4" Female NPT	40274-B5 \$2.49	40274-V5 \$4.16	40274-05 \$2.86
1/4" Hosebarb	40422-B5 \$2.49	40422-V5 \$4.16	40422-05 \$1.23
1/4" Push-In Tube	40435-B5 \$4.64	40435-V5 \$6.31	40435-05 \$3.82
5/16" Push-In Tube	40437-B5 \$4.74	40437-V5 \$6.40	40437-05 \$3.92
3/8" Hosebarb	40424-B5 \$2.48	40424-V5 \$4.16	40424-05 \$1.23
3/8" Push-In Tube	40436-B5 \$4.74	40436-V5 \$6.40	40436-05 \$3.92
1/2" Hosebarb	40426-B5 \$2.49	40426-V5 \$4.16	40426-05 \$1.23
Dual Cap Wye Adapter	40440-00 \$4.56	40440-V0 \$6.29	40440-01 \$4.39



NEW FOR 2017:
Metering Manifolds with Radiallock Caps & Pre-Orifices.
More details on Page 14/15.

COMBO-JET® FERTILIZER STREAMER CAPS

Two-Hole Fertilizer Streamer Caps

40432-047	RL FERTILIZER CAP, 2-HOLE @ 0.0469"	\$6.92
40432-086	RL FERTILIZER CAP, 2-HOLE @ 0.086"	\$6.92
40432-104	RL FERTILIZER CAP, 2-HOLE @ 0.104"	\$6.92

Three-Hole Fertilizer Streamer Caps

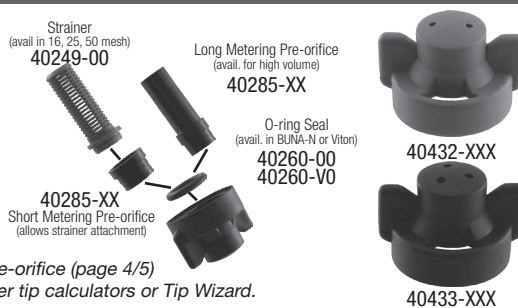
40433-047	RL FERTILIZER CAP, 3-HOLE @ 0.0469"	\$8.87
40433-067	RL FERTILIZER CAP, 3-HOLE @ 0.067"	\$8.87
40433-104	RL FERTILIZER CAP, 3-HOLE @ 0.104"	\$8.87

Slotted Strainers

40247-00	SLOTTED STRAINER - C/J - 16 MESH	\$1.65
40248-00	SLOTTED STRAINER - C/J - 25 MESH	\$1.65
40249-00	SLOTTED STRAINER - C/J - 50 MESH	\$1.65

For dribble banding use hose barb cap (above) with appropriate pre-orifice (page 4/5)

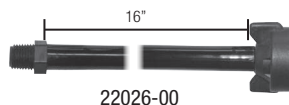
For selecting metering orifices, consult tip-charts, wilger.net fertilizer tip calculators or Tip Wizard.



RADIALLOCK HOSE DROP CAP ASSEMBLIES

For VITON® O-ring options, contact Wilger.

22021-00	16" NYLON HOSE DROP - 1/4" NPT-M x 1/4" NPT-M	\$8.34
22025-00	16" NYLON HOSE DROP - 1/4" NPT-F x 1/4" NPT-M	\$9.68
22026-00	16" NYLON HOSE DROP - R/L CAP x 1/4" NPT-M	\$8.55
22031-00	24" NYLON HOSE DROP - 1/4" NPT-M x 1/4" NPT-M	\$8.85
22035-00	24" NYLON HOSE DROP - 1/4" NPT-M x 1/4" NPT-F	\$10.75
22036-00	24" NYLON HOSE DROP - R/L CAP x 1/4" NPT-M	\$10.89
22048-00	48" NYLON HOSE DROP - R/L CAP x 1/4" NPT-M	\$21.22



For more information on hose drop assemblies, contact Wilger.

SQUARE LUG CAPS, SEALS AND STRAINERS

40150-00	NOZZLE STRAINER - FLANGED, 50 MESH	\$1.00
40151-00	NOZZLE STRAINER - FLANGED, 100 MESH	\$1.00
40159-05	NOZZLE CAP - SQ LUG., BLACK	\$0.72
40160-00	NOZZLE GASKET - UNIVERSAL EPDM	\$0.49
40160-V0	NOZZLE GASKET - UNIVERSAL VITON®	\$2.54
40198-SM	NOZZLE GASKET - SMALLER OD EPDM	\$0.49
40164-00	NOZZLE CAP-1/4" NPT FE, 45°, BLK	\$2.85
40180-05	SQ LUG, CAP BLANK - BLK	\$1.88



BOOM SIZE	INLET SIZE	DIRECTION	DESCRIPTION, PART# & MSRP							
			STANDARD SMOOTH CLAMP				BOLT MOUNT CLAMP			
			DIA. CHK VALVE	MANUAL ON/OFF	AIR-OFF OPERATED	PWM (W/O NUT)**	DIA. CHK VALVE	MANUAL ON/OFF	AIR-OFF OPERATED	PWM (W/O NUT)**
1/2" BOOM	3/8" INLET	ONE-WAY	41311-00 \$13.26	41313-00 \$14.68	41315-00 \$17.48	41317-00 \$8.87	41411-00 \$13.25	41413-00 \$14.68	41415-00 \$17.48	41417-00 \$8.87
		TWO-WAY	41312-00 \$14.72	41314-00 \$16.14	41316-00 \$18.94	41318-00 \$10.33	41412-00 \$14.72	41414-00 \$16.14	41416-00 \$18.94	41418-00 \$10.33
1" BOOM	3/8" INLET	ONE-WAY	41331-00 \$13.25	41333-00 \$14.68	41335-00 \$17.48	41337-00 \$8.87	41431-00 \$13.25	41433-00 \$14.68	41435-00 \$17.48	41437-00 \$8.87
		TWO-WAY	41332-00 \$14.72	41334-00 \$16.14	41336-00 \$18.94	41338-00 \$10.33	41432-00 \$14.72	41434-00 \$16.14	41436-00 \$18.94	41438-00 \$10.33
		ONE-WAY KWIKSTOP	41351-00 \$14.73	41353-00 \$16.31	41355-00 \$19.33	41357-00 \$9.85	41451-00 \$14.73	41453-00 \$16.31	41455-00 \$19.33	41457-00 \$9.85
		TWO-WAY KWIKSTOP	41352-00 \$16.35	41354-00 \$17.93	41356-00 \$20.96	41358-00 \$11.48	41452-00 \$16.35	41454-00 \$17.93	41456-00 \$20.96	41458-00 \$11.48
	9/16" INLET	ONE-WAY	41341-00 \$13.25	41343-00 \$14.68	41345-00 \$17.48	41347-00 \$8.87	41441-00 \$13.25	41443-00 \$14.68	41445-00 \$17.48	41447-00 \$8.87
		TWO-WAY	41342-00 \$14.72	41344-00 \$16.14	41346-00 \$18.94	41348-00 \$10.33	41442-00 \$14.72	41444-00 \$16.14	41446-00 \$18.94	41448-00 \$10.33
	21/32" HIGH FLOW INLET	TWO-WAY	41362-00 \$14.72	41364-00 \$16.14	41366-00 \$18.94	41368-00 \$10.33	41462-00 \$14.72	41464-00 \$16.14	41466-00 \$18.94	41468-00 \$10.33

Notes: **PWM bodies/turrets do not include a body nut



COMBO-RATE® II series saddles with integrated nozzle bodies are available with one or two COMBO-CLIP outlets. They are compatible with all male Combo-clip (CC) accessories.

COMBO-RATE® STACKING NOZZLE BODIES (use with COMBO-RATE® saddle bodies)

For VITON® O-ring options, contact Wilger.

MODEL	PART# / MSRP			
	DIA.CHK VALVE	MANUAL ON/OFF	AIR-OFF OPERATED	PWM (w/o nut)**
THRU BODY ASSY	41100-00 \$8.70	41110-00 \$9.94	41125-00 \$12.95	41135-00 \$3.94
END BODY ASSY	41101-00 \$7.93	41111-00 \$9.23	41126-00 \$12.22	41136-00 \$2.93
3 HEAD TURRET BODY	41503-00 \$17.44	41513-00 \$18.68	41543-00 \$21.48	41533-00 \$13.01
4 HEAD TURRET BODY	41504-00 \$17.44	41514-00 \$18.68	41544-00 \$21.48	41534-00 \$13.01
5 HEAD TURRET BODY	41505-00 \$17.44	41515-00 \$18.68	41545-00 \$21.48	41535-00 \$13.01
5 TURRET c/w 2 SQ. LUG*	41505-32* \$17.44	41515-32* \$18.68	41545-32* \$21.48	41535-32* \$13.01

41285-00 ADAPTER, C/C MALE x PLUG..... \$1.55

Notes:

* Nozzle body has 3 Combo-Jet & 2 square lug outlets

** PWM bodies/turrets do not include a body nut

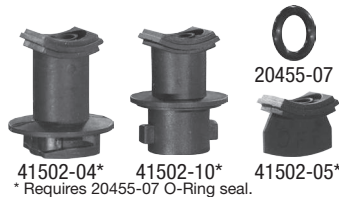
Buna-N seals are standard. VITON® seals available - contact factory



COMBO-RATE® stacking bodies can be mounted on any COMBO-RATE® saddles or any COMBO-RATE® accessory with a COMBO-CLIP outlet.

COMBO-RATE® REPLACEMENT PARTS

41502-11	TURRET BODY REPAIR KIT (2 BODIES) - BUNA-N	\$14.24
41502-12	TURRET BODY REPAIR KIT (2 BODIES) - VITON®	\$42.83
41502-04	TURRET OUTLET, COMBO-JET®	\$0.87
41502-10	TURRET OUTLET ARM, SQUARE LUG.....	\$0.87
41502-05	TURRET OUTLET PLUG.....	\$0.68
20455-07	TURRET OUTLET O-RING, #110 Duro 70, Buna-N.....	\$0.24
41100-15	O-RING REPAIR KIT (6 BODIES) - BUNA-N	\$8.63
41100-16	O-RING REPAIR KIT (6 BODIES) - VITON®	\$39.07



* Requires 20455-07 O-Ring seal.

COMBO-RATE® TURRET REPAIR KITS INCLUDE (Suitable for 2 bodies):
10x Turret Outlet O-Rings, 2x Turret Outlets, 2x Turret Plugs, 4x Turret Core O-rings, 2 Turret Lock Clips, and 2 Diaphragms.

COMBO-RATE® O-RING REPAIR KITS INCLUDE (For up to 6 stacking bodies):
6x Pressure Pad O-rings, 6x Inter-body O-rings, 6x Diaphragms.

NEW COMBO-RATE® II Inlet Design Update for 2016/17



In 2017, Wilger will be phasing in a new and improved design for the COMBO-RATE® II (CRII) nozzle body.

Improved debris clean-out slot

CRII inlets have a long clean-out slot, allowing for debris and chemical residue to be removed before build-up occurs. CRII inlets are especially useful for thin walled booms.

Webbed inlet support

The web across the inlet increases the strength of the inlet and also has the added benefit of creating a laminar flow into the nozzle body, without restricting flow.

Hi-Lo screw replacing nut and bolt

To retain the holding power of the nozzle body with a reduction of thread galling when being installed or replaced, Wilger is replacing the nut/bolt design with a stainless steel hi-lo screw.